LUCIANO ROCHA

Mineração oceânica:

uma alternativa sustentável para o aproveitamento de areias quartzosas

v. 1

São Paulo
2015

LUCIANO ROCHA

Mineração oceânica:

uma alternativa sustentável para o aproveitamento de areias quartzosas

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Ciências.

v. 1

São Paulo
2015

LUCIANO ROCHA

Mineração oceânica:

uma alternativa sustentável para o aproveitamento de areias quartzosas

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração:
Tecnologia Mineral

Orientador:
Prof. Dr. Homero Delboni Jr.

v. 1

São Paulo
2015

Catálogo-na-publicação

Rocha, Luciano

Mineração oceânica: uma alternativa sustentável para o aproveitamento de areias quartzosas / L. Rocha -- São Paulo, 2015.

2 vol. 820 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1.Mineração Submarina 2.Areia (uso) 3.Sustentabilidade I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

Dedico esta obra a meu pai e minha mãe pelo apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Mineração Jundu pelo apoio e incentivo durante o desenvolvimento deste trabalho, em particular àqueles que trabalharam na execução da parte experimental, Edemilson Marcatti, Eduardo Marchi, Reginaldo Leme, Dênis Binatto, Manoel Cordova, aos laboratoristas Eli Venâncio, José Carlos Souza e Paulo Falcaro. Agradeço também a Edson Gomiero, Noedir Nava, Cláudio Santiago e em especial, a um grande incentivador e entusiasta deste estudo, Luis Eduardo Pamplona Martins Pereira.

Agradeço aos amigos do Rio de Janeiro, Alexandre Carlos Braga, Marcus Teixeira, Professor Gilberto Dias da Universidade Federal Fluminense e Carlos Jamel, parceiros e fomentadores da sustentabilidade naquele estado. À Geodrill pelo trabalho de amostragem marinha, particularmente a Lincoln Coelho. Ao Centro Técnico de Elaboração do Vidro da Saint-Gobain (CETEV), particularmente a Marcos Gibim.

Agradeço à equipe do Laboratório de Caracterização Tecnológica da USP, especialmente à Dra. Manuela Tassinari, Juliana Lívi Antoniassi e ao Professor Dr. Henrique Kahn. Agradeço ainda a Thiago Jatobá, do Laboratório de Simulação de Processos da USP.

Agradeço à Professora Dra. Rachel A. Mills, da Faculdade de Ciências Naturais e Ambientais da Universidade de Southampton, Reino Unido pelas valiosas informações.

Agradeço ao amigo Professor Dr. Arthur Pinto Chaves pelos ensinamentos e sugestões a esta Tese.

Pelo carinho, apoio e paciência, agradeço à minha família, em especial a meu pai Vicente, minha mãe Maria Eugênia, minha irmã Gilmara, tias Silvia e Terezinha, minha avó Maria de Lourdes e meu primo Anderson.

Agradeço ainda a meu orientador e amigo, Professor Dr. Homero Delboni Júnior.

O vento e as ondas estão sempre a favor
do navegador habilidoso.
(Edward Gibbon)

RESUMO

Este estudo apresenta ao Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo (PMI) da Escola Politécnica da USP, e também a toda a sociedade, a importância que os oceanos têm com relação às suas riquezas minerais. Pretende ainda mostrar a grande responsabilidade que um empreendimento mineiro no fundo do mar precisa ter, com relação aos impactos ambientais, sendo possível minerar em regiões profundas no oceano promovendo a sustentabilidade. A ideia da mineração oceânica/submarina está ainda sendo amadurecida, este é o momento adequado para se propor metodologias de trabalho submarino sustentáveis; mitigar seus impactos. Este trabalho abrange o tema de maneira ampla, abordando o aspecto histórico, legal, ambiental, bem como questões técnicas de engenharia de minas, como sondagem submarina, caracterização tecnológica, lavra submarina, beneficiamento de minério oceânico e descarte de rejeitos. O trabalho apresenta os passos e resultados de um caso real de exploração oceânica. Trata-se de um estudo para viabilizar economicamente a extração e o beneficiamento de areia marinha, para fins industriais, proveniente da Baía de Guanabara (RJ). O trabalho apresenta desde o planejamento da amostragem no fundo do mar, execução destes trabalhos, caracterização tecnológica, simulação de processo e estudos específicos do uso industrial da areia após beneficiamento. Apresenta ainda uma proposta de rota de processo para a areia marinha e questões ligadas à lavra e ao descarte de rejeitos.

Palavras-chave: Mineração oceânica. Sustentabilidade. Areia. Legislação marinha. Sondagem submarina. Dragagem. Caracterização mineral. Beneficiamento mineral. Vidro. Fundição. Areia Frac. Concreto.

ABSTRACT

This study aims to show the importance of the oceans and its mineral wealth. It intends also to show the big responsibility that an undersea enterprise must bear concerning the environmental impact. It shows the availability to mine in a sustainable way in the bottom of the sea. The undersea mining is still raising, now is the auspicious time to suggest sustainably submarine work methodologies; to mitigate its impact. This study covers the historic, legal and environmental aspects, as well as technical issues of mining engineering such as undersea survey, process mineralogy, undersea mining, mineral beneficiation for marine ores and tailings disposal. This study presents the steps and results of a real subsea exploration case. The studied ore is a marine sand from Baía de Guanabara (Rio de Janeiro), aiming to supply industrial market. This is a feasibility and technical study to show how to exploit and process this kind of ore. The study shows the undersea survey planning and its execution, the process mineralogy planning and its results, process simulation and some specific studies to industrial uses for this sand, after its beneficiation. Besides these subjects, the study proposes an industrial process route for process and tailings disposal.

Keywords: Undersea Mining. Sustainability. Sand. Marine Legal Issues. Undersea Surveying. Dredging. Process Mineralogy. Mineral Beneficiation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cavas ilegais de extração de areia na região de Seropédica	40
Figura 2 – Cavas ilegais de extração de areia na região de Itaboraí.....	40
Figura 3 – Navio de pesquisa H.M.S. Challenger	44
Figura 4 – Nódulos manganésíferos no fundo do mar.....	45
Figura 5 – Representação esquemática da Zona Econômica Exclusiva (ZEE)	47
Figura 6 – Distribuição global dos recursos minerais marinhos em estágio inicial de exploração	51
Figura 7 – Batiscafo Trieste	55
Figura 8 – Veículo operado remotamente (ROV)	56
Figura 9 – Veículo subaquático autônomo (AUV).....	57
Figura 10 – Equipamento Vibracore sendo lançado ao mar	58
Figura 11 – Ilustração de uma embarcação equipada com ecobatímetro de múltiplos feixes	59
Figura 12 – Ilustração da técnica de sondagem eletromagnética	60
Figura 13 – Vista esquemática de uma embarcação operando com dragagem de areia por sucção.....	63
Figura 14 – Detalhe da ferramenta de corte de rocha.....	64
Figura 15 – Draga autopropelida de arrasto realizando extração submarina de areia.....	65
Figura 16 – <i>Dipper Dredge</i>	66
Figura 17 – <i>Dragline</i>	67
Figura 18 – <i>Bucket Wheel</i>	68
Figura 19 – Detalhe de uma draga de Alcatruzes em operação	70
Figura 20 – Draga de garra em operação	71
Figura 21 – Esquema de draga com retroescavadeira	73
Figura 22 – Marsh Excavator.....	74
Figura 23 – Esquema de dragagem com escavadeira tipo <i>Shovel</i>	75
Figura 24 – Dragagem por injeção de água (WID)	76
Figura 25 – Esquema de uma dragagem pneumática	77
Figura 26 – Principais tipos de equipamentos flutuantes de extração em águas profundas	78
Figura 27 – Seção típica de um tubo flexível para elevação de material extraído do fundo do mar.....	79
Figura 28 – Bomba DOP®	80

Figura 29 – Tipos de Bomba DOP®	81
Figura 30 – Coletor passivo do tipo Romboide.....	82
Figura 31 – Coletor passivo do tipo híbrido	82
Figura 32 – Coletor ativo mecânico	83
Figura 33 – Rampa hidráulica	84
Figura 34 – Elevador Hidráulico	85
Figura 35 – Tambor mecânico	86
Figura 36 – Elevador híbrido simples.....	87
Figura 37 – Arado hidráulico.....	87
Figura 38 – <i>Auxiliary Cutter</i> (AC).....	89
Figura 39 – <i>Bulk Cutter</i> (BC).....	89
Figura 40 – <i>Collection Machine</i> (CM)	90
Figura 41 – Sistema de bombeamento.....	90
Figura 42 – Tubo que transporta a polpa até a embarcação de apoio.....	91
Figura 43 – Production Support Vessel (PSV)	91
Figura 44 – Torre que sustenta o cabo rígido até o fundo do mar.....	92
Figura 45 – Desenho esquemático do processo de lavra em águas profundas idealizado pela Nautilus Minerals	93
Figura 46 – Domínios e principais zonas do oceano	98
Figura 47 – Fitoplâncton.....	99
Figura 48 – Zooplâncton.....	99
Figura 49 – Exemplos de nécton	100
Figura 50 – Fitobentos	101
Figura 51 – Zoobentos	101
Figura 52 – Bentos típico da epifauna	102
Figura 53 – Bentos típico da infauna.....	102
Figura 54 – Organismo bentônico sésil.....	103
Figura 55 – Organismo bentônico sedentário	103
Figura 56 – Organismo bentônico vágil.....	104
Figura 57 – Organismo bentônico perfurante.....	104
Figura 58 – Organismo bentônico pivotante.....	105
Figura 59 – Organismo bentônico cavador	105
Figura 60 – Organismo bentônico intersticial	106
Figura 61 – Organismo bentônico depositívoro	106

Figura 62 – Organismo bentônico filtrador	107
Figura 63 – Organismo bentônico necrófago.....	107
Figura 64 – Zona Econômica Exclusiva brasileira (linha amarela)	123
Figura 65 – Representação das linhas de base	124
Figura 66 – Regiões do mar e seus limites	125
Figura 67 – Critérios para delimitação da Plataforma continental Jurídica.....	126
Figura 68 – “Amazônia Azul” e áreas legais correspondentes	127
Figura 69 – Regiões legais na costa brasileira	129
Figura 70 – Coleta de amostra mineral em águas profundas	135
Figura 71 – “Chaminés” expelindo metais em águas marinhas profundas (<i>hydrothermal vents</i> ou <i>black smokers</i>)	136
Figura 72 – Nódulo de manganês recuperado por veículo remoto no Oceano Pacífico	138
Figura 73 – Crosta cobaltífera em um substrato hialoclástico retirado do Oceano Pacífico (espessura de cerca de 8 cm).....	139
Figura 74 – Chaminés hidrotermais inativas no fundo do mar de Lau Basin (Oceano Pacífico)	140
Figura 75 – Modelo desenvolvido pela Aker Wirth GmbH para coleta de nódulos de manganês.....	141
Figura 76 – Regiões promissoras para aproveitamento de elementos de terras raras pelos japoneses	143
Figura 77 – Extração de diamantes na costa da Namíbia pelo método de Mineração Marinha Horizontal.....	146
Figura 78 – Extração de diamantes na costa da Namíbia pelo método de Mineração Marinha Vertical.....	147
Figura 79 – Embarcação utilizada pela De Beers para realizar mineração oceânica de diamantes na costa da Namíbia	148
Figura 80 – Extração de diamantes na costa da Namíbia pelo método de Dragagem por Sucção	149
Figura 81 – Extração de estanho no mar da Indonésia	150
Figura 82 – Lavra de cassiterita em Rondônia.....	155
Figura 83 – Operações de dragagem de diamantes no Rio Jequitinhonha, Minas Gerais	157
Figura 84 – Classificação granulométrica de materiais arenosos	159
Figura 85 – Processos de formação de areia	165
Figura 86 – Peças encontradas em sítios arqueológicos, produzidas com obsidianas	174

Figura 87 – Referência à lenda em que mercadores fenícios descobriram acidentalmente o vidro	175
Figura 88 – Vidro pastoso líquido sendo enrolado sobre a argila para preparar um jarro .	176
Figura 89 – Peças de vidro produzidas no Egito – 1.500 a.C.....	176
Figura 90 – Vidro sendo soprado	177
Figura 91 – Confeção do modelo.....	195
Figura 92 – Confeção do molde.....	196
Figura 93 – Fusão do metal	196
Figura 94 – Processo de vazamento.....	197
Figura 95 – Processo de desmoldagem.....	197
Figura 96 – Modelo de uma máquina simples de moldagem Shell e etapas do processamento.....	202
Figura 97 – Fraturamento de poço petrolífero com utilização de areia Frac	205
Figura 98 – Principais áreas produtoras de areia industrial no Brasil	242
Figura 99 – Localização geográfica das operações da Mineração Jundu	272
Figura 100 – Vista aérea da Unidade de Analândia	274
Figura 101 – Perfil geológico esquemático da Mina de Analândia.....	275
Figura 102 – Camada superior, formada por sedimentos da Era Cenozoica e Arenitos da Formação Botucatu	275
Figura 103 – Camada intermediária, formada por arenitos da Formação Piramboia	276
Figura 104 – Camada inferior, formada por arenitos da Formação Piramboia	276
Figura 105 – Diagrama esquemático do tratamento de minérios da Unidade de Analândia.....	277
Figura 106 – Vista aérea da Unidade de Descalvado	278
Figura 107 – Perfil geológico esquemático da Mina de Descalvado.....	279
Figura 108 – Cobertura Cenozoica na Mina de Descalvado	279
Figura 109 – Camada de arenito da Formação Piramboia	280
Figura 110 – Diagrama esquemático do tratamento de minérios da Unidade de Descalvado.....	281
Figura 111 – Vista aérea da Unidade de Balneário Barra do Sul.....	282
Figura 112 – Dragagem utilizada para lavra subaquática de areia industrial em Balneário Barra do Sul	283
Figura 113 – Detalhe da maraca de corte.....	283

Figura 114 – Diagrama esquemático do tratamento de minérios da Unidade de Balneário Barra do Sul	284
Figura 115 – Unidade de Viamão.....	285
Figura 116 – Detalhes das camadas sedimentares na Mina de Viamão	286
Figura 117 – Diagrama esquemático do tratamento de minérios da Unidade de Viamão...	287
Figura 118 – Bacia da Guanabara.....	289
Figura 119 – Municípios da Baía de Guanabara	290
Figura 120 – Mapa geológico do embasamento da porção centro-ocidental do “ <i>Rift</i> ” da Guanabara.....	292
Figura 121 – Classificação textural dos sedimentos de fundo da Baía de Guanabara baseado no Diagrama Triangular de Shepard (1954).....	293
Figura 122 – Frequência de areia nos sedimentos de fundo	294
Figura 123 – Distribuição da mediana nos sedimentos de fundo	295
Figura 124 – Classes de arredondamentos dos grãos de quartzo	296
Figura 125 – Presença de quartzo na composição mineralógica da fração arenosa	298
Figura 126 – Presença de micas na composição mineralógica da fração arenosa	299

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Reservas de areia industrial por estados	251
Gráfico 2 – Produção de areia industrial por estados.....	252
Gráfico 3 – Produção beneficiada de areia industrial por estados	254
Gráfico 4 – Valoração da produção de areia industrial.....	256
Gráfico 5 – Porte das minas de areia industrial.....	258
Gráfico 6 – Porte das usinas de beneficiamento de areia industrial	260
Gráfico 7 – Investimentos realizados nas minas	263
Gráfico 8 – Investimentos realizados nas plantas de beneficiamento	265

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Recursos mineria marinhos	49
Quadro 2 – Comparativo entre os tipos de bateria mais comuns para uso submarino	94
Quadro 3 – Principais impactos ambientais em ambiente marinho	112
Quadro 4 – Minerais de valor socioeconômico para o Brasil	153
Quadro 5 – Minerais de valor político-estratégico para o Brasil.....	154
Quadro 6 – Propriedades do concreto influenciadas pelas características do agregado.....	220
Quadro 7 – Normas brasileiras sobre agregados miúdos na construção civil	224
Quadro 8 – Normas brasileiras referentes ao bem mineral areia	225

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores médios de biomassa de organismos bentônicos em diferentes profundidades.....	109
Tabela 2 – Conceito granulométrico de areias.....	161
Tabela 3 – Especificações químicas gerais das areias vidreiras para os diferentes tipos de vidro	173
Tabela 4 – Especificações para areias de faturamento (<i>Frac Sand</i>) – API RP 56:1995	207
Tabela 5 – Especificação química de areia para produção de silicato de sódio ...	210
Tabela 6 – Especificação granulométrica de areia para produção de silicato de sódio	210
Tabela 7 – Classificação das areias para uso como agregado miúdo na construção civil.....	216
Tabela 8 – Exemplo de cálculo granulométrico e módulo de finura para areia de construção civil (ABNT NBR NM 248:2003).....	216
Tabela 9 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo	218
Tabela 10 – Limites máximos aceitáveis de substâncias nocivas no agregado miúdo com relação à massa do material.....	219
Tabela 11 – Limites máximos para a expansão devida à reação álcali-agregado e teores de cloretos e sulfatos presentes nos agregados	220
Tabela 12 – Projeção do consumo de areia como agregado na construção civil em três cenários de PIB.....	227
Tabela 13 – Consumo de agregados (areia e brita) por região.....	227
Tabela 14 – Participação dos agregados pelos segmentos consumidores	228
Tabela 15 – Destinação da areia no segmento de construção civil (ano 2000)	228
Tabela 16 – Evolução da demanda de areia e projeções até 2022	229
Tabela 17 – Quantidades e valores das vendas de areia para construção (ano de 2009)	229
Tabela 18 – Principais empresas produtoras de areia para construção (ano de 2009).....	230
Tabela 19 – Mercado consumidor de areia para construção (distribuição regional)	231
Tabela 20 – Consumo de areia (bruta e beneficiada) por setor (usos)	232

Tabela 21 – Produção mundial de areia para construção (Estados Unidos, Canadá e Brasil)	233
Tabela 22 – Consumo de areia no Brasil em milhões de toneladas (1975 – 2007)	233
Tabela 23 – Projeção da produção de areia no Brasil (em milhões de toneladas)	234
Tabela 24 – Projeção de consumo de areia no Brasil (em milhões de toneladas)	235
Tabela 25 – Produção e projeção de produção de areia no Brasil (2000 - 2020)..	236
Tabela 26 – Evolução da demanda e projeções para 2022.....	237
Tabela 27 – Resumo das produções e projeções de produção de areia para construção no Brasil, entre as diversas fontes de dados (em milhões de toneladas).....	238
Tabela 28 – Resumo do consumo e projeções de consumo de areia para construção no Brasil, entre as diversas fontes de dados (em milhões de toneladas).....	240
Tabela 29 – Porte das minas.....	244
Tabela 30 – Porte das usinas	244
Tabela 31 – Principais empresas produtoras	244
Tabela 32 – Principais empresas produtoras	247
Tabela 33 – Exportação de produtos - principais países de destino	249
Tabela 34 – Importação de produtos - principais países de origem	249
Tabela 35 – Reservas de areia industrial por estados.....	250
Tabela 36 – Produção de areia industrial por estados	251
Tabela 37 – Produção beneficiada de areia industrial por estados	253
Tabela 38 – Valoração da produção de areia industrial.....	255
Tabela 39 – Porte das minas de areia industrial.....	257
Tabela 40 – Porte das usinas de beneficiamento de areia industrial.....	259
Tabela 41 – Principais empresas produtoras de areia industrial e posição de mercado.....	261
Tabela 42 – Investimentos realizados nas minas	262
Tabela 43 – Investimentos realizados nas plantas de beneficiamento	264
Tabela 44 – Mercado consumidor de produtos brutos (distribuição setorial).....	266

Tabela 45 – Mercado consumidor de produtos beneficiados (distribuição setorial)	267
Tabela 46 – Mercado consumidor de produtos brutos (distribuição regional)	268
Tabela 47 – Mercado consumidor de produtos beneficiados (distribuição regional)	269
Tabela 48 – Classes de arredondamento dos grãos de quartzo	296

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABIFA	Associação Brasileira de Fundição
a.C.	Antes de Cristo
AC	<i>Auxiliary Cutter</i>
ADA	Área Diretamente Afetada
AFNOR	Association Française de Normalisation
AFS	<i>American Foundry Society</i>
AID	Área de Influência Direta
AMB	Anuário Mineral Brasileiro
Anepac	Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil
API	<i>American Petroleum Institute</i>
AR	Arenito
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AUV	<i>Autonomous Underwater Vehicles</i>
BA	Bahia
BC	<i>Bulk Cutter</i>
BGR	<i>Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe</i>
BGS	<i>British Geological Survey</i>
CBE	Companhia Brasileira de Equipamento
CE	Ceará
Cembra	Centro de Excelência para o Mar Brasileiro
CEMP	Comissão de Estudos de Matérias Primas
CERHI	Comitê Estadual de Recursos Hídricos
CETEV	Centro Técnico de Elaboração do Vidro
CFEM	Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais
CGS	<i>China Geological Survey</i>
CHM	Centro de Hidrografia da Marinha
Cia	Companhia
CIV	Companhia Industrial de Vidros
CLPC	Comissão de Limites da Plataforma Continental

CM	<i>Collection Machine</i>
CNUDM	Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar
Comoc	Coordenação de Mineração e Obras Cíveis
COMPRA	<i>China Ocean Mineral Resources Research and Development Association</i>
Conama	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COT	Carbono Orgânico Total
CPAD	Central de Processamento, Armazenamento e Destinação
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CSEM	<i>Controlled Source Electromagnetic</i>
d.C.	Depois de Cristo
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação
Dilic	Diretoria de Licenciamento Ambiental do Ibama
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DS	<i>Density Separator</i>
DSM	<i>Deep Sea Mining</i>
DSTP	<i>Deep Sea Tailings Placement</i>
DSVS	<i>Deep Submergence Vehicles</i>
EDS	<i>Energy Dispersive X-ray Spectrometry</i>
EEZ	<i>Exclusive Economic Zones</i>
ES	Espírito Santo
EUA	Estados Unidos da América
FOB	<i>Free on Board</i>
Fosfomar	Fosforitas Marinhas da Plataforma Continental
FPSO	<i>Floating Production, Storage and Offloading</i>
FSSIM	<i>Flow Sheet Simulator</i>
GO	Goiás
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSI	<i>Geological Survey of India</i>
H.M.S.	<i>His/Her Majesty's Ship</i>
Ibama	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
Ibram	Instituto Brasileiro de Mineração

ICDD	<i>International Centre for Diffraction Data</i>
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IMO	<i>International Maritime Organization</i>
IQD	Inverso da Potência da Distância
ISA	<i>International Seabed Authority</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ITLOS	<i>International Tribunal for the Law of the Sea</i>
LCT	Laboratório de Caracterização Tecnológica
Leplac	Plano de Levantamento da Plataforma Continental Brasileira
LTDA	Sociedade Limitada
LTW	<i>Loaded Wheel Tester</i>
m.m.	Milhas Marítimas
Marpol	<i>International Convention for the Prevention of Pollution from Ships</i>
MBES	<i>Multi-beam Echo Sounder</i>
MCJ	Margem Continental Jurídica
MDT	Modelo Digital de Terreno
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MF	Módulo de Finura
MG	Minas Gerais
ms	Massa Seca
MS	Mato Grosso do Sul
msf	Massa Seca Final
msi	Massa Seca Inicial
msl	Massa Seca Lavada
MT	<i>Magnetotelluric</i>
N	Norte
NBR	Norma Brasileira
NE	Nordeste
NM	Norma Mercosul
OD	Oxigênio Dissolvido
Oilpol	<i>International Convention for the Prevention of Pollution of the Sea by Oil</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PA	Pará

PAN-ICSD	<i>PANalytical Inorganic Crystal Structure Database</i>
PB	Paraíba
PC	Plataforma Continental
PCA	Plano de Controle Ambiental
PCJ	Plataforma Continental Jurídica
PCJB	Plataforma Continental Jurídica Brasileira
PE	Pernambuco
P.F.	Perda ao Fogo
PIB	Produto Interno Bruto
PMI	Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo
ppm	parte por milhão
PPSO	<i>Floating Production, Storage and Offloading</i>
PR	Paraná
Proarea	Programa Área Internacional do Atlântico Sul e Equatorial
Procordilheira	Projeto de Prospeção e Exploração de Sulfetos Polimetálicos da Cordilheira Meso-Atlântica
PSRM	Plano Setorial para os Recursos do Mar
PSV	<i>Production Suport Vessel</i>
RAL	Relatório Anual de Lavra
RALS	<i>Riser and Lifting System</i>
RCA	Relatório de Controle Ambiental
Remplac	Programa de Avaliação da Potencialidade Mineral da Plataforma Continental Jurídica Brasileira
REY	<i>Rare-earth Elements and Yttrium</i>
RJ	Rio de Janeiro
RNFT	Resíduo Não Filtrável Total
ROM	<i>Run of Mine</i>
ROV	<i>Remotely Operated Vehicles</i>
RS	Rio Grande do Sul
S.A.	Sociedade Anônima
SBES	<i>Single-beam Echo Sounder</i>
SC	Santa Catarina
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SMARJA	Sociedade dos Mineradores de Areia do Rio Jacuí Ltda.

SOLAS	<i>International Convention for the Safety of Life at Sea</i>
SP	São Paulo
SPHT	<i>Sphericity</i>
SPT	<i>Seafloor Production Tools</i>
SSLP	<i>Subsea Slurry Lift Pump</i>
STD	<i>Submarine Tailings Disposal</i>
TBE	Tetrabromoetano
TLP	<i>Tension Leg Platform</i>
USGA	<i>United States Golf Association</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
USP	Universidade de São Paulo
UTM	Universal Transversa de Mercator
W	Oeste
WHIMS	<i>Wet High Intensity Magnetic Separator</i>
WID	<i>Water Injection Dredging</i>
ZEE	Zonas Econômicas Exclusivas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	33
2	MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	35
3	REFLEXÕES E CONCEITUAÇÕES	37
4	REVISÃO DA LITERATURA	43
4.1	MINERAÇÃO OCEÂNICA	43
4.1.1	Considerações iniciais	44
4.1.2	Métodos de sondagem	53
4.1.2.1	<i>Deep Submergence Vehicles (DSVS)</i>	54
4.1.2.2	Veículos operados remotamente (<i>Remotely Operated Vehicles – ROV</i>)....	55
4.1.2.3	Veículos Subaquáticos Autônomos (<i>Autonomous Underwater Vehicles – AUV</i>)	56
4.1.2.4	Sondagem com Vibracore.....	57
4.1.2.5	Exploração por Ecobatimetria	58
4.1.2.6	Exploração Eletromagnética	59
4.1.3	Métodos de extração de material subaquático.....	61
4.1.3.1	Dragagem convencional: dragagem por sucção	62
4.1.3.2	Dragagem convencional: dragas de corte e sucção	63
4.1.3.3	Dragagem convencional: dragas autopropelidas de arrasto	64
4.1.3.4	Dragagem convencional: dragagem mecânica	65
4.1.3.5	Dragagem convencional: escavadeiras frontais (<i>Dipper Dredges</i>)	66
4.1.3.6	Dragagem convencional: <i>dragline</i> ou draga de pá de arrasto.....	67
4.1.3.7	Dragagem convencional: draga de roda de caçamba (<i>Bucket Wheel</i>)	67
4.1.3.8	Dragagem convencional: dragas com elevadores de caçambas ou de Alcatruzes	68
4.1.3.9	Dragagem convencional: draga de garra	70
4.1.3.10	Dragagem convencional: draga com retroescavadeira	72
4.1.3.11	Dragagem convencional: “escavadeira flutuante”	74
4.1.3.12	Dragagem convencional: dragas com escavadeira <i>Shovel</i>	74
4.1.3.13	Outros métodos: dragagem hidrodinâmica por injeção de água (<i>Water Injection Dredging – WID</i>)	75
4.1.3.14	Outros métodos: dragagem pneumática (<i>Air Lift</i>)	76
4.1.3.15	Outros métodos: equipamentos flutuantes de lavra	77

4.1.3.16	Outros métodos: bombas multifuncionais submersas.....	79
4.1.3.17	Outros métodos: coletores	81
4.1.3.18	O Estado da Arte em lavra de mar profundo.....	88
4.1.4	Suprimento de energia elétrica.....	93
4.1.5	Aspectos ambientais marinhos	95
4.1.5.1	Introdução às questões ambientais	95
4.1.5.2	Estudos ambientais.....	96
4.1.5.3	Estudos Ambientais: definições básicas sobre o ambiente marinho.....	97
4.1.5.4	Estudos Ambientais: definições básicas sobre os seres marinhos	98
4.1.5.5	Estudos Ambientais: bentos.....	100
4.1.5.6	Estudos Ambientais: impactos ambientais.....	110
4.1.5.7	Estudos Ambientais: efeitos dos principais impactos ambientais	112
4.1.5.8	Estudos Ambientais: mitigação	118
4.1.5.9	Estudos Ambientais: deposição de rejeitos em mar profundo	118
4.1.5.10	Estudos Ambientais: regulamentação global de descarte.....	119
4.1.6	Aspectos legais da mineração oceânica	120
4.1.6.1	A questão da Amazônia Azul	128
4.1.6.2	O alto mar	129
4.1.6.3	Área Internacional dos Fundos Marinhos (Área).....	130
4.1.6.4	Autoridade Internacional dos Fundos Marinhos (Autoridade)	130
4.1.6.5	Tribunal Internacional dos Direitos do Mar (International Tribunal for the Law of the Sea - ITLOS)	131
4.1.6.6	Organização Marítima Internacional (IMO)	131
4.1.6.7	Legislação mineral brasileira.....	132
4.1.7	Exemplos atuais de mineração oceânica	134
4.1.7.1	Projeto Solwara 1.....	134
4.1.7.2	Alemanha.....	137
4.1.7.3	Bélgica	141
4.1.7.4	Japão	142
4.1.7.5	China	143
4.1.7.6	Coreia do Sul	144
4.1.7.7	Índia	145
4.1.7.8	Mineração de diamantes na costa da Namíbia	145
4.1.7.9	Indonésia	149

4.1.7.10	Brasil	150
4.1.7.10.1	<i>Operações brasileiras de dragagem mineral</i>	155
4.2	AREIA	158
4.2.1	Definições	158
4.2.2	Origem das areias	164
4.2.3	Usos das areias	170
4.2.3.1	Principais propriedades das areias	172
4.2.3.2	Indústria de fabricação de vidros	172
4.2.3.2.1	<i>Tipos de vidros</i>	<i>180</i>
4.2.3.2.2	<i>Fibra de vidro</i>	<i>182</i>
4.2.3.2.3	<i>Propriedades dos vidros</i>	<i>183</i>
4.2.3.3	Indústria de fundição	185
4.2.3.3.1	<i>Características da areia base</i>	<i>188</i>
4.2.3.3.2	<i>Características das areias de fundição</i>	<i>193</i>
4.2.3.3.3	<i>O Processo de fundição</i>	<i>194</i>
4.2.3.3.4	<i>Resinas utilizadas no processo de fundição</i>	<i>198</i>
4.2.3.3.5	<i>Fundição em areia verde</i>	<i>200</i>
4.2.3.3.6	<i>Shell Molding</i>	<i>201</i>
4.2.3.4	Indústria de cerâmicas e refratários	203
4.2.3.5	Fritas cerâmicas	203
4.2.3.6	Indústrias petrolíferas (Fraturamento Hidráulico)	204
4.2.3.7	Indústrias químicas	208
4.2.3.7.1	<i>Indústria de tintas</i>	<i>208</i>
4.2.3.7.2	<i>Indústria de borracha e plástico</i>	<i>209</i>
4.2.3.8	Produção de silicato de sódio	209
4.2.3.9	Indústria de cimento	210
4.2.3.10	Abrasivos	211
4.2.3.11	Meios filtrantes	212
4.2.3.12	Construção civil	215
4.2.3.12.1	<i>Pavimentações</i>	<i>223</i>
4.2.3.13	Esporte	226
4.2.4	Panorama brasileiro de areia para construção civil	226
4.2.4.1	Resumo	237
4.2.5	Panorama brasileiro de areia industrial	242

4.2.5.1	Principais áreas produtoras de areia industrial	242
4.2.5.2	Dados estatísticos.....	243
4.3	MINERAÇÃO JUNDU	271
4.3.1	Histórico da empresa.....	271
4.3.2	Pesquisa geológica	272
4.3.3	Unidades produtivas.....	273
4.3.3.1	Unidade de Analândia.....	273
4.3.3.1.1	Operação	277
4.3.3.2	Unidade de Descalvado.....	277
4.3.3.2.1	Operação	280
4.3.3.3	Balneário Barra do Sul.....	281
4.3.3.3.1	Operação	284
4.3.3.4	Unidade de Viamão	285
4.3.3.4.1	Operação	286
4.3.4	Principais produtos	287
4.4	A Baía de Guanabara	289
4.4.1	Aspectos gerais	289
4.4.2	Geologia na Bacia da Guanabara	291
4.4.2.1	Classificação dos sedimentos de fundo, com base no diagrama triangular de Shepard (1954)	292
4.4.2.2	Frequência de areia nos sedimentos	294
4.4.2.3	Classes de arredondamento	295
4.4.2.4	Composição mineral da fração arenosa	298
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	329
5.1	CAMPANHA DE SONDAGEM DAS AREIAS MARINHAS DA BAÍA DE GUANABARA.....	330
5.1.1	Conceitos.....	330
5.1.2	Locação das sondagens	331
5.1.3	Execução da sondagem	335
5.2	CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA PRELIMINAR	343
5.2.1	Recebimento das amostras em laboratório.....	343
5.2.2	Descrição geológica visual expedita	345
5.2.3	Individualização das amostras	345
5.2.4	Processamento mineral.....	347

5.2.4.1	Preparação laboratorial das amostras	347
5.2.4.2	Processamento das amostras	349
5.2.4.2.1	<i>Cálculo do percentual de argila presente nas amostras</i>	354
5.2.4.2.2	<i>Separação das frações</i>	356
5.2.4.2.3	<i>Análises granulométricas</i>	357
5.2.4.2.4	<i>Tratamento da fração -0,600 +0,075 mm</i>	361
5.2.4.2.5	<i>Pulverização das amostras</i>	364
5.3	ANÁLISE POR AGRUPAMENTO POR MEIO DE DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X	365
5.4	SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO	367
5.4.1	Simulações de processos por furos de sondagem	367
5.4.2	Simulações de processo por amostras	369
5.4.2.1	Descritivo dos processos: Processo I - Máximo Rendimento Mássico ...	370
5.4.2.2	Descritivo dos processos: Processo II - Atingir Especificação Vidreira ..	374
5.5	ANÁLISES ESTATÍSTICAS PARA DEFINIÇÃO DE AGRUPAMENTOS (<i>CLUSTER ANALYSIS</i>)	377
5.5.1	Análise descritiva	377
5.5.2	Análise por agrupamento	378
5.5.3	Método de associação	379
5.5.4	Medidas de similaridade	381
5.5.5	Variáveis discriminantes	382
5.6	CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA FINAL	383
5.6.1	Tratamento da fração -3,35 mm	385
5.6.2	Cálculo de porcentagem de argilas	388
5.6.3	Cálculo de porcentagem de argila (-0,044 mm)	388
5.6.4	Cálculo de porcentagem de argila AFS	388
5.6.5	Análises granulométricas e separação magnética a úmido	392
5.6.6	Tratamento da fração +3,35 mm	393
5.7	AVALIAÇÃO DAS AREIAS PARA APROVEITAMENTO COMO PROPANTE (AREIA FRAC)	396
5.7.1	Determinação da solubilidade em ácido	398
5.7.2	Teste de esmagamento (<i>Crush Test</i>)	400
5.8	EXPERIMENTO LABORATORIAL DE FABRICAÇÃO DE VIDRO (FUSÃO EM ESCALA DE BANCADA - ENSAIO QUALITATIVO)	404

5.8.1	Primeiro ensaio: preliminar	404
5.8.2	Fusão das amostras após formação dos grupos.....	409
5.8.2.1	Segundo ensaio: não variando a formulação	410
5.8.2.1.1	<i>Procedimento experimental</i>	<i>410</i>
5.8.2.2	Terceiro ensaio: variando a formulação (1.330 °C por 30 minutos)	414
5.8.2.3	Quarto ensaio: variando a formulação (1.380 °C por 30 minutos)	416
5.8.2.4	Quinto ensaio: variando a formulação (1.380 °C por 60 minutos)	416
5.9	AVALIAÇÃO DAS AREIAS PARA APROVEITAMENTO NA INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO	417
5.9.1	Definições	418
5.9.2	Procedimento	418
5.9.3	Confecção da placa de cura	424
5.9.4	Confecção dos corpos de prova.....	425
5.9.5	Determinação do tempo de vida de banca.....	425
5.9.6	Determinação do tempo de cura.....	426
5.9.7	Determinação das resistências à tração	427
5.10	AVALIAÇÃO DAS AREIAS PARA APROVEITAMENTO NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	429
5.10.1	Determinação de parâmetros técnicos: densidade real pelo Método da Picnometria.....	430
5.10.1.1	Procedimento	430
5.10.2	Determinação de parâmetros técnicos: pH	433
5.10.3	Determinação de parâmetros técnicos: massa unitária solta.....	436
5.10.4	Determinação de parâmetros técnicos: massa unitária compactada	437
5.10.5	Avaliação preliminar para aproveitamento das areias na fabricação de concreto	439
5.10.5.1	Fabricação do concreto.....	439
5.10.5.1.1	<i>Procedimento</i>	<i>441</i>
5.10.5.2	Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (<i>Slump Test</i>).....	444
5.10.5.2.1	<i>Materiais</i>	<i>445</i>
5.10.5.2.2	<i>Procedimento</i>	<i>446</i>
5.10.5.3	Moldagem dos corpos de prova cilíndricos	450

5.10.5.3.1	<i>Procedimento</i>	451
5.10.5.4	Ensaio de resistência à compressão axial	457
5.10.5.5	Ensaio para determinação de módulos de elasticidade	461
5.10.5.5.1	<i>Procedimento</i>	463
6	RESULTADOS	467
6.1	ESTUDOS AMBIENTAIS	467
6.1.1	Plano de Controle Ambiental (PCA)	467
6.1.1.1	Programa de Monitoramento das Variações Morfológicas do Fundo Marinho nas Áreas Dragadas	468
6.1.1.1.1	<i>Contexto</i>	468
6.1.1.1.2	<i>Objetivo geral</i>	468
6.1.1.1.3	<i>Objetivos específicos</i>	469
6.1.1.2	Programa de Monitoramento da Hidrodinâmica e da Qualidade da Água	469
6.1.1.2.1	<i>Contexto</i>	469
6.1.1.2.2	<i>Objetivos</i>	470
6.1.1.3	Programa de Monitoramento da Biota Bentônica	471
6.1.1.3.1	<i>Justificativa</i>	471
6.1.1.3.2	<i>Área de abrangência</i>	473
6.1.1.3.3	<i>Objetivos</i>	474
6.1.1.3.4	<i>Metas</i>	475
6.1.1.4	Estudos ambientais: caracterização do bentos	475
6.1.1.4.1	<i>Coleta</i>	475
6.1.1.4.2	<i>Resultados das coletas</i>	477
6.1.1.4.3	<i>Conclusões do estudo bentônico</i>	479
6.2	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA PRELIMINAR	480
6.2.1	Análise geológica visual expedita	480
6.2.2	Processamento mineral	481
6.2.2.1	Fração +3,35 mm	481
6.2.2.2	Análise do percentual de argila (-0,044 mm)	484
6.2.2.3	Tratamento da fração -3,35 +0,044 mm (amostras “lavadas”)	486
6.2.2.3.1	<i>Resultados granulométricos</i>	486
6.2.2.3.2	<i>Análises químicas</i>	503

6.2.2.4	Tratamento da fração -0,600 +0,075 mm.....	505
6.2.2.4.1	<i>Análises químicas</i>	505
6.2.2.4.2	<i>Separação magnética a úmido</i>	507
6.2.2.4.3	<i>Separação magnética a seco</i>	510
6.2.2.4.4	<i>Análise da possível influência do processo de atrição na quebra de conchas</i>	511
6.3	RESULTADOS DAS ANÁLISES POR AGRUPAMENTO POR MEIO DE DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X	517
6.4	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE PROCESSO DE BENEFICIAMENTO	520
6.4.1	Simulações por furo	520
6.4.2	Simulações de processo por amostras	522
6.5	RESULTADOS DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS PARA DEFINIÇÃO DE AGRUPAMENTOS (<i>CLUSTER ANALYSIS</i>)	532
6.5.1	Estatísticas descritivas	532
6.5.2	Análise por agrupamento	536
6.6	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA FINAL.....	545
6.6.1	Fração -3,35 mm	545
6.6.2	Fração -0,600 +0,075 mm	552
6.6.3	Confronto de resultados	557
6.6.4	Fração +3,35 mm	558
6.7	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE PROCESSO	560
6.8	PROPOSTA DE ROTA DE PROCESSO INDUSTRIAL	562
6.9	MODELAMENTO GEOLÓGICO	565
6.9.1	Dados topográficos	565
6.9.2	Banco de dados usados na modelagem	567
6.9.3	Modelagem geológica	567
6.9.4	Modelo de blocos	568
6.9.5	Curvas de isovalores	576
6.9.6	Curvas de parametrização	578
6.9.7	Geometalurgia	582
6.9.8	Comentários sobre a modelagem geológica	584
6.10	RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DAS AREIAS MARINHAS PARA APROVEITAMENTO COMO PROPANTE (<i>FRAC SAND</i>)	586

6.11	RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS LABORATORIAIS DE FABRICAÇÃO DE VIDRO (FUSÃO EM ESCALA LABORATORIAL – TESTE QUALITATIVO)	588
6.11.1	Primeiro ensaio: preliminar (exploratório)	589
6.11.2	Segundo ensaio: não variando a formulação	590
6.11.3	Terceiro, quarto e quinto ensaios: variando a formulação.....	591
6.12	RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DAS AREIAS MARINHAS PARA APROVEITAMENTO NA INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO	598
6.13	RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DAS AREIAS PARA APROVEITAMENTO NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	601
6.13.1	Resultados da caracterização	602
6.13.1.1	Densidade real	602
6.13.1.2	pH	602
6.13.1.3	Massa unitária solta e compactada	603
6.13.2	Resultados das avaliações das areias para fabricação de concreto	604
6.13.2.1	Análises granulométricas	604
6.13.2.2	Ensaio de Abatimento (<i>Slump Test</i>)	605
6.13.2.3	Resistência à Compressão Axial.....	606
6.13.2.4	Módulo de Elasticidade	607
6.14	CONSIDERAÇÕES FINAIS (ENSAIOS DE SEPARABILIDADE MINERAL EM LÍQUIDOS DENSOS)	608
6.14.1	Procedimento.....	609
6.14.2	Resultados químicos	614
6.14.3	Comentários sobre os ensaios de separabilidade mineral em líquidos densos	625
6.14.4	Análises por difração de raios-x das fases	626
6.14.5	Comentário Final	630
7	CONCLUSÕES	631
	REFERÊNCIAS.....	635
	ANEXO A - Nota técnica emitida pela Secretaria de Estado do Ambiente do Governo do Rio de Janeiro	649
	ANEXO B - Aviso aos navegantes informando a realização da sondagem.....	656

ANEXO C - Relatório das análises por agrupamento através de difratometria de raios-x	657
ANEXO D - Imagens de microscópio para definição de graus de arredondamento e esfericidade	684
ANEXO E - Relação das normas brasileiras (ABNT) vigentes atualmente relacionadas ao concreto	689
ANEXO F - Resolução CONAMA 357/2005	693
ANEXO G - Estatística descritiva dos produtos simulados	720
ANEXO H - Técnica <i>Two-step Cluster</i> para determinação da importância de cada preditor	743
ANEXO I - Certificados das análises químicas realizadas no CETEV para o estudo de fusão das areias visando fabricação de vidro	745
ANEXO J - Tabelas referentes aos ensaios de determinação de densidades reais	749
ANEXO K - Relatório dos ensaios de Resistência à Compressão e de Módulos de Elasticidade dos corpos de prova cilíndricos de concreto.....	750
ANEXO L - Relatório sobre os resultados das separações minerais por líquidos densos.....	791
ANEXO M - Fotos das amostras obtidas nos ensaios em líquido denso.....	793
ANEXO N - Certificados dos resultados de identificação de fases por difratometria de raios-x para produtos dos ensaios em líquidos densos.....	813

1 INTRODUÇÃO

O fundo do mar sempre fascinou o homem ao longo de sua história evolutiva, talvez por sua imensidão, pelo mistério, ou pela própria natureza curiosa do ser humano.

No século XIX, mais precisamente no ano de 1870, o grande escritor francês Jules Verne, em sua obra “20.000 Léguas Submarinas” não só aguçou ainda mais a curiosidade do homem pelos mistérios do fundo do mar, mas imensamente encorajou o desenvolvimento de tecnologias para a exploração submarina. Quão vasto é o fundo do mar e o que pode haver nele?

O “fundo do mar”, ou “assoalho marinho” possui um vasto território inexplorado, rico em bens minerais. Estes bens minerais podem ser desde areias industriais, calcários, etc. para suprir as necessidades básicas do ser humano até metais e minerais raros para desenvolvimentos de alta tecnologia.

As questões mais importantes para o desenvolvimento da mineração oceânica são o desenvolvimento de tecnologias para a exploração/extração e a sustentabilidade. A questão do desenvolvimento tecnológico passa pelos desafios de se minerar em grandes profundidades, em um ambiente marinho corrosivo, além de efeitos como das marés, baixas temperaturas, visibilidade restrita, distância da costa e outras intempéries, dependendo da localização da jazida. A questão da sustentabilidade é de grande importância pelo fato de que o mar é habitat de milhares de espécies de criaturas vivas coexistindo neste ambiente. O minerador submarino tem responsabilidade direta sob a cadeia ecossistêmica da região a ser minerada e sua área de influência, que pode se estender a dezenas ou centenas de quilômetros.

Outro fator que diferencia a mineração oceânica da mineração terrestre ou subterrânea é a questão legal ou geopolítica. Muitas vezes o depósito mineral a ser explorado e/ou explotado está em águas internacionais, fora das Zonas Econômicas Exclusivas, onde esforços adicionais podem ser necessários.

Portanto a mineração oceânica, embora rica em oportunidades, também é rica em desafios, sejam eles técnicos, políticos, legais ou ambientais. Esta Tese se propõe a estudar os pontos mais relevantes do que pode ser chamada de “Nova Fronteira da Mineração”, bem como elucidar dúvidas e apresentar resultados práticos, positivos e negativos da Mineração Oceânica.

2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

A grande motivação para o desenvolvimento desta Tese foi a de apresentar tanto para o Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo da Universidade de São Paulo, quanto para a sociedade, que não é apenas possível, mas imperativo que a atividade minerária trabalhe com foco na sustentabilidade. A segunda motivação, não menos importante, é a de despertar a curiosidade para a exploração e mineração oceânica, sendo o assoalho marinho, ou fundo do mar, fonte riquíssima de bens minerais.

A mineração do século XXI em diante não pode e não deve estar desvinculada do conceito hoje conhecido com Sustentabilidade. Na verdade, este conceito deve ser a base filosófica para qualquer atividade minerária. Agricola (1556), em seu lendário tratado póstumo De Re Metallica já afirmava no Livro II que o minerador não pode estar alheio a muitas artes e ciências, sendo a primeira delas a Filosofia. Esta assertiva, atualizada para os dias atuais é interpretada pelo autor desta Tese da seguinte forma: todo empreendimento (*lato sensu*), sendo ele de ordem empresarial, social, pessoal, político, religioso, etc. precisa ser fundamentado em uma filosofia. A da mineração deve ser a de conservação dos recursos minerais, aplicando-se o conceito da sustentabilidade: gerar riqueza ao minerador, à sociedade, ao Estado e garantir a integridade e preservação do meio ambiente.

Baseada nesta linha de pensamento nasce uma oportunidade de estudo, vinculada a um potencial aproveitamento econômico de um depósito mineral de areias marinhas. O depósito, situado na Baía de Guanabara, cidade do Rio de Janeiro (RJ) é objeto de estudo desta Tese, cujos principais objetivos são de:

- a) Despertar o interesse pela riqueza mineral depositada no ambiente submarino;
- b) Apresentar aspectos legais e ambientais na exploração e exploração de recursos minerais submarinos;
- c) Estabelecer um texto que reúna, em um único lugar, os escassos trabalhos sobre mineração oceânica, bem como areia e seus usos, ou seja, uma obra de referência bibliográfica;
- d) Estudar a viabilidade técnica de aproveitamento de um depósito marinho de areia;

- e) Favorecer o processo de descontaminação da água da Baía de Guanabara;
- f) Estabelecer uma metodologia para caracterização tecnológica da areia marinha para produção de areia industrial e de construção civil.

3 REFLEXÕES E CONCEITUAÇÕES

Prelúdio

Diante do ineditismo, da relativa ausência de literatura especializada sobre o tema “mineração oceânica” e de sua importância para o futuro da mineração, faz-se necessário algumas discussões preliminares para que sejam esclarecidos e definidos conceitos relevantes ao propósito desta Tese. O segundo ponto abordado nesta seção é a questão dos benefícios ambientais que a mineração oceânica trará para a Baía de Guanabara.

Durante o exame de qualificação para esta Tese, foram levantadas questões sobre o real foco do estudo, que poderia ser mais próximo do assunto “dragagem” do que de “mineração oceânica”. O autor desta Tese respeitosamente discorda e, à luz do presente trabalho, apresenta suas razões.

Para o engenheiro de minas, a palavra lavra tem o significado de extração ou retirada do bem mineral da natureza. Portanto, para cada tipo de jazimento e/ou bem mineral, existe um ou mais métodos de extração adequados.

Dragagem é um dos métodos (e o mais utilizado) para retirada de substâncias subaquáticas, ou seja, é um termo genérico para remoção de material submerso. Estas substâncias podem ser das mais variadas naturezas, desde lodo, lixo, material contaminado até importantes e valiosos bens minerais. A dragagem é uma técnica muito antiga e bastante dominada pelo homem e, para fins de mineração, é apenas um caso particular de dragagem. O termo dragagem não representa este trabalho.

O autor desta Tese entende que Mineração Oceânica é algo muito mais amplo e completo (e complexo), incorporando todas as etapas e fases que um projeto de mineração deva possuir, carregando ainda, a particularidade e as dificuldades que o ambiente marinho oferece. As etapas básicas que um projeto de mineração deve considerar passa pela prospecção, exploração, caracterização tecnológica, modelamento geológico, estudos ambientais, desenvolvimento da mina, planejamento de lavra, execução da lavra, beneficiamento mineral, disposição de estéril, tratamento de efluentes, saúde e segurança ocupacional, questões legais, sociais, além de outros.

Esta Tese aborda os principais pontos que uma mineração oceânica sustentável necessita, abrangendo, dentro da especificidade “submarina”, questões legais, impactos e estudos ambientais, sondagem, caracterização tecnológica,

estudos para possíveis usos do minério, métodos e lavra e desenvolvimento de rotas de processo.

Pontuo aqui, em 11 tópicos, o resultado de minhas reflexões sobre o verdadeiro tema de minha Tese:

- a) Esta Tese não trata de definição de método de lavra, nem é específico sobre dragagem. Um dos métodos de lavra que pode ser estudado para o projeto em questão é a dragagem. Portanto, o método de extração por “dragagem” pode ser uma das técnicas de lavra a ser empregada neste estudo de mineração;
- b) O escopo é muitíssimo mais amplo do que o tema “dragagem”. Não se pode comparar “dragagem do Rio Tietê”, por exemplo, com a complexidade deste trabalho;
- c) A lavra ocorrerá em ambiente submarino (assoalho marinho). Esteja o assoalho marinho a 20 metros de profundidade ou 1.600 metros de profundidade, ambas estão em ambiente submarino, claro que com particularidades e dificuldades específicas;
- d) Estudos ambientais foram realizados para obtenção das licenças, incluindo estudos sobre os organismos marinhos da região a ser impactada;
- e) Foi realizado todo o procedimento junto ao Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) para a obtenção de alvará de pesquisa (requerimento de pesquisa no mar);
- f) Houve planejamento de sondagem e execução de campanha de amostragem com método específico para sondagem submarina;
- g) Foram realizados estudos de caracterização tecnológica com o minério, incluindo simulação e desenvolvimento de rotas de processo visando o beneficiamento mineral;
- h) Desenvolveu-se um modelo geológico para a jazida;
- i) Discutiu-se a influência da altura da lâmina d’água e correntes marítimas na distribuição granulométrica do material;
- j) Foi abordada a questão que trata do descarte de rejeitos em ambiente marinho;
- k) Realizaram-se ensaios para viabilizar diferentes usos para o minério.

O autor compreende e está seguro de que o foco desta Tese é realmente Mineração Oceânica.

O segundo assunto a ser abordado nesta seção é a questão ambiental, que é ponto forte deste trabalho. O projeto de mineração oceânica aqui estudado vai além de ser ambientalmente correto. Ele vai ao encontro a interesses de órgãos ambientais do estado do Rio de Janeiro.

Segundo Calaes (2006), o papel do setor mineral, na economia, compreende: descobrir, delinear e desenvolver depósitos minerais econômicos; posteriormente, lavrando-os, processando e comercializando seus produtos. O descobrimento e comprovação de um depósito mineral econômico é o ponto de partida, é o "gatilho" que dispara o processo de suprimento mineral. O estímulo básico para a ativação deste processo decorre da dicotomia existente entre potencialidades (ambiente geológico - recursos hipotéticos – potencial mineral) e as necessidades estabelecidas pela demanda de bens minerais na economia. Muito claramente pode-se verificar nos dias atuais que os debates preservacionistas vêm dando lugar a discussões técnicas que harmonizam a evolução com a conservação, e que propiciam a reversão do falso dilema: mineração versus meio ambiente.

A extração de areia na região da entrada da Baía de Guanabara tem uma conotação importante sobre o ponto de vista ambiental. A região, sujeita ao assoreamento, seria beneficiada com o processo de retirada dos bancos de areia (minério) ali presentes.

Ao se extrair areia de certas regiões da Baía de Guanabara (como no caso deste estudo), aumenta-se a profundidade, favorecendo o fluxo de entrada de água oceânica na Baía, melhorando a qualidade da água em seu interior. Em certas regiões da Baía de Guanabara, a água tem péssima qualidade, chegando a ser contaminada, em alguns pontos.

Outra questão abordada é a da clandestinidade e ilegalidade da maioria das extrações de areia no estado do Rio de Janeiro. A região de Seropédica (Figura 1), bem como as cavas de Itaboraí (Figura 2) são exemplos de depredação ambiental, causada pela extração irregular de areia; muitas vezes essas operações são confundidas com “mineração”.

Figura 1 – Cavas ilegais de extração de areia na região de Seropédica

Fonte: Google Earth (2014).

Figura 2 – Cavas ilegais de extração de areia na região de Itaboraí

Fonte: Google Earth (2014).

Além do impacto positivo direto do desassoreamento da entrada da Baía de Guanabara, também pode-se considerar que a mineração oceânica legal e sustentável irá contrapor e competirá diretamente com as extrações clandestinas e ilegais que suprem a alta demanda de areia no estado do Rio de Janeiro. Essas cavas ilegais sofreriam a concorrência da areia legalizada, podendo culminar ao

menos potencialmente na desestimulação de tal atividade predatória e degradadora do meio ambiente.

A oferta de areia legalizada praticamente dentro da cidade do Rio de Janeiro será uma grande vantagem sob o ponto de vista ambiental. Pode ainda considerar a diminuição da circulação de caminhões transportando areia pelas estradas já bastante sobrecarregadas, reduzindo ainda a emissão de gases poluentes.

Pelos motivos citados acima, em novembro de 2008, a Secretaria de Estado do Ambiente (Governo do Estado Rio de Janeiro) emitiu uma Nota Técnica (Anexo A) apoiando a iniciativa da mineração de areia na Baía de Guanabara.

Um paradigma é quebrado neste momento. Enquanto nos casos comuns de mineração a empresa precisa convencer os órgãos ambientais de que o empreendimento é sustentável, além de compensar os eventuais impactos ambientais, no caso muito particular desta proposta em estudo, é de interesse do órgão ambiental de que ocorra a mineração, trazendo os benefícios citados acima.

Outro aspecto positivo que a mineração na Baía de Guanabara trará se relaciona com a segurança dos navios que entram pela Baía. Com a retirada dos bancos de areia (minério), a profundidade da entrada da Baía de Guanabara seria aumentada, permitindo que embarcações de maior calado possam navegar com maior segurança.

Todos esses aspectos têm grande importância no desenvolvimento desta Tese, pois a comprovação da viabilidade técnica da extração e beneficiamento de bancos de areia da Baía de Guanabara, além dos aspectos econômico, social e político envolvidos, trará consequências benéficas ao meio ambiente no estado do Rio de Janeiro.

Embora o foco principal deste estudo seja o uso industrial da areia marinha, outros usos como na construção civil, por exemplo, também estão sendo levados em consideração. Desta forma, a recuperação mássica do material pode ser ampliada, com o uso de outras faixas granulométricas rejeitadas pela indústria do vidro, por exemplo.

O autor desta Tese entende sua importância social, ambiental e, por que não dizer, da contribuição positiva que este trabalho trará para o futuro sustentável da mineração. Na verdade, o futuro expresso aqui é o rumo que a mineração precisará seguir, sendo o momento atual o mais propício para estabelecermos padrões de sustentabilidade.

4 REVISÃO DA LITERATURA

Prelúdio

A revisão da literatura desta Tese se apresenta de forma volumosa e extensa, bem como também apresenta grande variação de assuntos. Isso é devido a alguns fatores inerentes ao tema estudado. O primeiro fator a ser citado é com relação à especificidade e ineditismo do tema mineração oceânica/submarina, que carrega suas particularidades legais, técnicas e, principalmente, ambientais. O autor julgou importante ter reunidos, em uma única obra, todos estes assuntos importantes que poderão servir de guia para trabalhos (científicos ou tecnológicos) futuros, assuntos estes que serão detalhados ao longo desta seção.

Outro fator que contribuiu para a extensão desta seção foi descoberto durante as fases iniciais de pesquisa. Em função da escassa (ou mesmo desatualizada) literatura disponível sobre o importante bem mineral “areia”, objeto deste estudo, o autor se motivou a estender a revisão da literatura e estabelecer uma obra de referência sobre esse minério, abrangendo em uma única obra todos os seus aspectos relevantes, partindo desde a gênese até seus usos e especificações, bem como levantamento de dados estatísticos do mercado brasileiro, nem sempre disponíveis por meios oficiais.

4.1 MINERAÇÃO OCEÂNICA

A mineração oceânica pode ser considerada a nova fronteira da mineração. Depósitos minerais em quantidades ainda não calculadas encontram-se tanto no assoalho marinho, quanto em seu subsolo. Depósitos minerais de alto teor estão disponíveis para o aproveitamento sustentável do homem, a fim de suprir suas necessidades básicas.

O aumento da demanda por bens minerais ao longo dos anos está levando à exaustão os depósitos minerais ricos (SANTOS, 2003). Contribuindo com este fato, com o crescimento da população mundial e a melhoria no índice de desenvolvimento humano (IDH), as reservas minerais continentais de alto teor estão se esgotando rapidamente (ROCHA, 2008). Torna-se premente o desenvolvimento e a consolidação de um novo conceito de mineração. A mineração oceânica ecologicamente sustentável deverá ser a atividade base para o desenvolvimento da civilização moderna.

4.1.1 Considerações iniciais

Quando o navio de pesquisa britânico H.M.S.¹ Challenger² (Figura 3) içou nódulos de manganês (Figura 4) do fundo do oceano durante a sua épica expedição em 1873, houve o primeiro despertar na curiosidade sobre minerais do fundo do mar. Anos, mais tarde, a expedição Albatross (1899–1900) realizou uma extensiva coleta destes nódulos na costa oeste dos Estados Unidos no Oceano Pacífico (SHARMA, 2010). Entretanto, somente após a Segunda Guerra Mundial, aqueles nódulos manganésíferos se tornaram mais importante do que apenas uma simples descoberta científica. O *boom* do pós-guerra ocasionou um aumento nos preços dos metais e, como resultado houve um real interesse, agora comercial, por minérios depositados no fundo do mar, principalmente para manganês, níquel e cobre que se tornaram bastante valiosos. Além disso, o interesse pela exploração do assoalho do Oceano Pacífico, principalmente para cobalto, aumentou consideravelmente, interesse este que se estendeu a outras regiões (GIBBONS et al., 1987). Mas somente nos anos 1960 que foi realmente estabelecido por Mero (1965) o grande potencial dos recursos minerais nas profundezas dos oceanos.

Figura 3 – Navio de pesquisa H.M.S. Challenger

Fonte: Tizard et al. (1885).

¹ O prefixo H.M.S. ou HMS precedido do nome do navio é utilizado pela Marinha Real Britânica desde 1789 e significa His/Her Majesty's Ship.

² O nome causou inspiração e foi utilizado posteriormente para batizar o Módulo Lunar da Espaçonave Apolo 17, bem como o Ônibus Espacial norte-americano, fatidicamente destruído em uma explosão após a decolagem em 1986.

Figura 4 – Nódulos manganésíferos no fundo do mar

Fonte: Eating Jellyfish (2013).

Ainda que os nódulos manganésíferos sejam reconhecidos como os primeiros recursos minerais marinhos, o descobrimento e produção de óleo e gás *offshore* no início dos anos 1940 nos Estados Unidos (estado de Louisiana) contribuíram imensamente para o reconhecimento do potencial econômico do fundo do mar (CLARK; CLARK, 1984).

Segundo Gibbons et al. (1987), a Segunda Guerra Mundial deixou um legado de capacidade tecnológica sem precedentes para a exploração dos oceanos. Oceanógrafos foram bastante beneficiados, pois naquele período foram desenvolvidos vários equipamentos de bordo e sensores de pesquisa. Era interesse dos militares expandirem suas pesquisas científicas no oceano, bem como a exploração comercial. Ao longo das últimas décadas, muito foi aprendido sobre os segredos dos oceanos; várias descobertas foram feitas. Por exemplo, somente nos anos 1960 a comunidade científica comprovou que a Teoria da Deriva dos Continentes (Tectônica de Placas), publicada em 1915 pelo meteorologista alemão Alfred Wegener, não era apenas uma teoria, mas sim uma realidade. Salgado-Labouriau (1994) expõe que dentre as várias evidências que comprovam a teoria da deriva dos continentes listadas por Wegener, a principal delas foi a descoberta de uma grande quantidade de tilitos permocarboníferos na Índia em 1856. Tilito é considerada uma rocha sedimentar que se forma apenas sob uma espessa camada de gelo glacial. A grande extensão destes tilitos, naquela época, mostrava a presença de glaciações extensas em uma região onde hoje o clima é quente. Tilitos

datados da mesma idade foram encontrados em seguida em outros continentes: 1856, no sul da Austrália; 1870, na África do Sul; 1888, no sul do Brasil. Como todos esses tilitos foram formados na mesma época pode-se afirmar que houve glaciação simultânea no Permocarbonífero de todas estas regiões, fato este que só poderia ser explicado por duas situações: ou os polos mudaram de lugar (o que não explica estas ocorrências totalmente) ou, os continentes se moveram. Esta segunda opção foi a escolhida por Wegener.

Portanto, agora se sabe que a superfície da Terra é construída por "placas", que se movimentam entre si, de maneira lenta, mas constante. As placas se separam ao longo de centros de expansão, onde material crustal novo é incorporado; elas colidem ao longo de zonas de subducção, onde material crustal antigo é empurrado para baixo. Embora estas placas se movam a velocidades de apenas uns poucos centímetros por ano, o material crustal se move como se estivesse sobre um transportador de correia, a partir dos centros de expansão para as zonas de subducção. A partir destas comprovações, descobriu-se que os centros de expansão do assoalho marinho são zonas de potencial criação de depósitos de minerais que a humanidade tanto necessita para seu bem estar e desenvolvimento. Estes locais de formação de depósitos minerais são frequentemente *habitats* para comunidades biológicas (GIBBONS et al., 1987).

De acordo com Rona (2002, 2003), as bacias oceânicas eram consideradas como contêineres passivos até a comprovação da teoria da tectônica de placas, nos anos 1960. De acordo com essa visão de que as bacias oceânicas são como contêineres passivos, os depósitos minerais de não metais / não combustíveis eram considerados derivados primariamente da erosão de rochas continentais que foram transportadas para os oceanos pelos rios, em forma de sedimentos particulados ou em fases dissolvidas. Esta visão explica adequadamente os minerais marinho conhecidos naquela época. Estes incluem depósitos de placeres de vários minerais metálicos relativamente densos e pedras preciosas de origem terrígena, isto é, derivadas de erosão de rochas continentais e transportadas mecanicamente, classificadas e concentradas pelo fluxo das águas nos sedimentos *offshore*. A contribuição dos rios é considerada uma fonte adequada de elementos químicos dissolvidos que podem formar nódulos e crostas manganesíferas, fosforitos e outros tipos de depósitos autigênicos precipitados da água do mar.

A teoria da tectônica de placas mudou a visão de que a bacia oceânica era simplesmente um reservatório de minerais erodidos de fontes continentais para fontes ativas de mineralização em adição às fontes continentais. O foco mudou de processos erosivos em terra para processos tectônicos e magmáticos nas regiões de limites de placas (divergentes e convergentes), amplamente submersas nas profundezas dos oceanos, agindo localmente (embora pertencesse a um sistema global) promovendo trocas de calor e elementos químicos entre o manto, a crosta e os oceanos.

Segundo Gibbons et al. (1987), a partir da década de 1960, alguns países costeiros estabeleceram “Zonas Econômicas Exclusivas (ZEE)” (*Exclusive Economic Zones* – EEZ, em inglês); áreas que se estendem 200 milhas náuticas (370,4 km) em direção ao alto mar, a partir de linhas base da costa, onde as nações gozam de direitos de soberania sobre todos os recursos, vivos e não vivos (Figura 5).

Figura 5 – Representação esquemática da Zona Econômica Exclusiva (ZEE)

Fonte: Gibbons et al. (1987).

A metodologia básica para o desenvolvimento da exploração submarina passa, basicamente por: descobrir os depósitos minerais submarinos (prospecção), explorar e descrever tais depósitos, avaliar a possibilidade de desenvolver a potencialidade de recursos minerais no oceano, estudar a economicidade do projeto e mercado consumidor, avaliar as implicações ambientais. Conhecer a contribuição e os benefícios que os minerais do fundo do mar podem trazer para a nação, a importância dos minerais do fundo do mar em relação ao mundo e estudar concorrentes terrestres.

Continua Gibbons et al. (1987), citando que o conhecimento sobre geologia marinha cresceu bastante no pós-guerra. Esse conhecimento tem feito cientistas reverem suas teorias sobre a formação de alguns depósitos minerais, possibilitando prever onde novos depósitos podem ser encontrados. Por exemplo, muitas características de depósitos minerais continentais podem ser encontradas em depósitos que foram formados no assoalho marinho, ou sob ele. O conhecimento adquirido ao se estudar a formação de um depósito no assoalho marinho pode ajudar a explicar depósitos formados no continente. Ao mesmo tempo, o vasto conhecimento de depósitos minerais continentais obtido ao longo de anos de pesquisa geológica, e pela observação geológica, pode fornecer pistas e evidências sobre a natureza e localização possível dos minerais marinhos.

Por exemplo, depósitos de areia da praia contendo minerais pesados (tais como cromita ou monazita) que se formaram sob o oceano antes do recuo de antigos mares podem ajudar a identificar a provável localização e composição de depósitos semelhantes localizados em áreas próximas à costa. Depósitos de sulfetos polimetálicos ricos em cobre, zinco, e chumbo, agora em continente, mas formados no fundo do mar, podem trazer grandes conhecimentos e ajudar na compreensão da evolução deste tipo de depósito que possa ainda se encontrar sob o oceano.

Se imaginarmos o planeta Terra sem o oceano, o assoalho marinho seria de aproximadamente 71% de toda a superfície (EGOROV et al., 2012; PARADA et al., 2012). Se analisarmos desde as praias, passando pelas águas rasas costeiras, o mar profundo e o assoalho marinho, encontraremos abundância de minerais marinhos depositados em todas as profundidades (ERRY, 2002 apud AGARWAL et al., 2012).

Rona (2002) apresenta um quadro resumo (Quadro 1) sobre os recursos minerais marinhos classificador por região marítima, origem e forma de ocorrência. Rona (2003) também estabelece um mapa (Figura 6), apresentando as localizações dos depósitos minerais conhecidas, porém ainda pouco mineradas. O Quadro 1 associado à Figura 6 pode ser considerado como um guia inicial para a prospecção mineral no fundo do mar.

Quadro 1 – Recursos mineria marinhos

Região	Origem	Modo de Ocorrência			
		Inconsolidado	Consolidado	Fluido	Calor
Margem Continental (plataforma, talude e elevação)	Terrigeno (derivado de erosão e intemperismo de rochas continentais)	<p>Não metais:</p> <p>Depósitos de praia: areias silosas e cascalhos (quartzo)</p> <p>Depósitos de pláceres: diamantes</p> <p>Metais:</p> <p>Depósitos de pláceres: metais pesados e minerais nativos</p> <p>Bário (barita, whiterita)</p> <p>Cromo (cromita)</p> <p>Ouro</p> <p>Ferro (hematita, magnetita, siderita)</p> <p>Terras raras (monazita, basanita)</p> <p>Estanho (cassiterita)</p> <p>Titânio (ilmetita, rutilo)</p> <p>Tório (monazita)</p> <p>Tungstênio (scheelita, wolframita)</p> <p>Zircônio (zircão)</p>		<p>Soluções na água do mar:</p> <p>Sais (halita, cloreto de sódio)</p> <p>Magnésio</p> <p>Bromita</p> <p>Bicarbonatos</p> <p>Ácido bórico</p> <p>Cálcio</p> <p>Fluorita</p> <p>Potássio</p> <p>Estrôncio</p> <p>Sulfato</p> <p>Tório</p>	
	Biogênico (derivado de organismos)	<p>Depósitos de praia: calcário (calcita, aragonita), lamas, areia de conchas</p> <p>Corais preciosos</p> <p>Pérola (cultura primária)</p>	<p>Carvão</p> <p>Calcário</p> <p>Gás hidratos (metano)</p> <p>Enxofre (nativo ou como sulfato)</p>		

continua

					conclusão
Região	Origem	Modo de Ocorrência			Calor
		Inconsolidado	Consolidado	Fluido	
Margem Continental (plataforma, talude e elevação)	Autigênico (precipitados de água do mar)	Calcário (calcita, aragonita), lamas, areia de conchas Depósitos de praia ou pláceres: areias ferrosas (glauconita) Depósitos particulados: fosforita (apatita, fluorapatita, etc.)	Depósitos acamadados sólidos: fosforita (apatita, fluorapatita, etc.) Crostras de ferromanganês ricas em cobalto Fosforita Potássio Sais (halita, cloreto de sódio) Enxofre (nativo ou como sulfato)	Petróleo (óleo e gás)	
		Diagenético (produzido por alteração de material pré-existente)	Depósitos particulados: fosforita (apatita, fluorapatita, etc.)		
		Vulcanogenético (derivado de erupções vulcânicas)	Depósitos acamadados sólidos: fosforita (apatita, fluorapatita, etc.) Depósitos em filões ou veios (todos os elementos) Depósitos de sulfetos massivos (cobre, ferro, zinco, prata, ouro)		Energia Geotermal
				Água	
		Meteórico (derivado da atmosfera)		Água fresca (desalinização da água do mar)	
Bacia Oceânica	Biogênico (derivado de organismos)			Petróleo (óleo e gás)	
	Autigênico (acumulados da água do mar)	Nódulos manganêsíferos (manganês, ferro, níquel, cobalto, cobre)	Crostras de ferromanganês ricas em cobalto		
		Vulcanogenético (derivado de erupções vulcânicas)	Sedimentos metalíferos (manganês, ferro, cobre, chumbo, zinco, ouro, prata) Encrustações de manganês Sulfetos massivos polimetálicos (cobre, ferro, zinco, prata, ouro) Sulfetos de níquel-platina Cromo (cromita) Enxofre (nativo ou como sulfato)	Fluidos hidrotermais (metais)	Energia Geotermal
				Água	

Fonte: Rona (2002).

Figura 6 – Distribuição global dos recursos minerais marinhos em estágio inicial de exploração

Fonte: Rona (2003).

Outra fonte muito importante e rica em minerais são os placeres. Segundo Silva (2000), placeres são acumulações sedimentares formadas pela concentração mecânica de minerais detríticos de valor econômico, incluindo diversos bens metálicos ou pedras preciosas, originados a partir da decomposição e erosão de rochas-fonte, principalmente ígneas, mas também de rochas metamórficas e sedimentares. Estes minerais detríticos geralmente têm peso específico maiores que do quartzo ($2,65 \text{ g/cm}^3$), podendo variar de 2,9 a 21 g/cm^3 . Nas regiões costeiras e plataforma continental, os depósitos de minerais pesados têm sua gênese associada aos fenômenos de erosão, transporte e deposição de sedimentos pela ação das ondas e correntes costeiras, em íntima associação com as modificações decorrentes das variações eustáticas do nível do mar que caracterizaram todo o período Quaternário. Em função destas modificações do nível marinho, muitas concentrações são também associadas a depósitos fluviais, que recobriam grande parte da plataforma continental, exposta durante fases de nível “mar baixo” e que foram posteriormente afogadas, pela transgressão marinha que ocorreu no final do Pleistoceno e início do Holoceno.

Os placeres marinhos são fontes ricas de bens minerais e veem sendo explorados e extraídos em uma diversidade de locais nas linhas de costa e plataformas continentais pelo globo. Segundo Seibold e Berger (1996 apud SILVA, 2000), 70% da produção mundial de zircão vêm de depósitos de placeres marinhos do leste da Austrália. Placeres de diamantes em praias e na plataforma continental ocorrem a Sudoeste da África e Namíbia. Minerações de magnetita em placeres marinhos desenvolvem-se em regiões do Japão e da Nova Zelândia. Nos Estados Unidos, ouro é explotado em placeres de praias do Alaska, ilmenita na Califórnia e Leste da Flórida, cromita, ouro, platina e outros minerais pesados em praias do Oregon. Na Índia se extrai ilmenita em praias, bem como cassiterita na Tailândia, Malásia e Indonésia. No Brasil, as principais áreas de exploração de minerais pesados ocorrem em placeres associados a terraços marinhos elevados situados acima, ou adjacentes a falésias do Grupo Barreiras, no litoral sul da Bahia, Espírito Santo, Paraíba e norte do estado do Rio de Janeiro (SILVA, 2000).

4.1.2 Métodos de sondagem

Prelúdio

Esta seção foi incluída devido às particularidades que envolvem uma sondagem mineral oceânica em relação às sondagens continentais. Trata-se, pois, de uma amostragem não convencional, merecendo ser descrita.

Segundo Sharma (2011), a questão ambiental na mineração oceânica tem dupla implicação, tanto a mineração causa impactos no ambiente marinho, quanto o ambiente marinho causa impactos na mineração no fundo do mar.

Os efeitos do ambiente marinho causam grandes dificuldades aos estudos e operações no mar. As dificuldades que envolvem a sondagem no mar são numerosas, porém nos últimos 30 anos essas dificuldades têm sido identificadas e soluções técnicas têm sido buscadas. Os principais dificultadores na exploração e extração de minerais submarinos são (PERFURAÇÃO..., 2013):

- a) Efeito das marés;
- b) Ação dos ventos;
- c) Ação das ondas;
- d) Correntes marítimas;
- e) Topografia do fundo marinho;
- f) Profundidade do fundo marinho;
- g) Efeito corrosivo das águas marinhas;
- h) Profundidade que o furo precisa atingir;
- i) Falta de iluminação;
- j) Baixas temperaturas;
- k) Distância da costa.

As tecnologias disponíveis para sondagem em ambientes marinhos profundos estão cada dia mais sofisticadas e confiáveis. Além dos tradicionais métodos de sondagem existentes, como perfuração, geofísica, geoquímica, etc., na mineração oceânica ainda pode-se utilizar outros métodos, devido à suas características peculiares, como a profundidade da lâmina d'água, por exemplo.

A avaliação dos recursos minerais depositados no fundo do mar requer uma investigação que abrange desde as condições geográficas, topográficas e

geológicas do ambiente marinho, visando à obtenção de informações confiáveis. Diversos tipos de equipamento e técnicas têm sido desenvolvidos para esta investigação, sendo apresentados a seguir.

4.1.2.1 *Deep Submergence Vehicles (DSVS)*

Alvin, Guimarães e Fernandes (2013) citam o batiscafo Trieste (Figura 7), que foi um projeto suíço construído na Itália para pesquisar o mar profundo com uma tripulação de duas pessoas. Embora não possa ser considerado como um equipamento de sondagem, o Trieste foi um marco importante na história da conquista do mar profundo, sendo lançado no Mar Mediterrâneo em 1953 e atingiu uma profundidade máxima recorde de 10.911 metros. Hoje o Trieste está em exposição no *National Museum of the United States Navy*, em Washington D. C., nos Estados Unidos.

O batiscafo tinha capacidade de ser operado independente do navio-mãe, não precisando de cabos umbilicais. Uma janela cônica de *Plexiglas®* permitia aos tripulantes a observação direta. Lastros metálicos, presos magneticamente permitiam aumentar o peso do batiscafo para acelerar a descida. Quando retirado, o empuxo fazia o aparelho emergir. Por estarem acoplados magneticamente, em caso de falha do sistema elétrico (provida por meio de baterias) os pesos se desprenderiam levando o Trieste automaticamente à superfície. Tanques de lastro internos com gasolina (menos densa que a água) garantia o empuxo para cima após o desprendimento dos lastros metálicos. Também era utilizado um sistema de reciclagem para purificação do ar (através de cilindros de oxigênio e absorção química por CO₂).

Figura 7 – Batiscafo Trieste

Fonte: Alvin, Guimarães e Fernandes (2013).

4.1.2.2 Veículos operados remotamente (*Remotely Operated Vehicles – ROV*)

Um ROV (Figura 8) é um veículo subaquático conectado por um cabo, não tripulado e altamente manobrável. Os ROVs são operados por uma pessoa que fica dentro de uma embarcação na superfície e ficam ligados ao barco por um tirante (por vezes referido como um cabo umbilical), que é composto por um grupo de cabos que transportam energia elétrica e sinais de vídeo e dados em mão dupla, entre o operador e o veículo. A maioria dos ROVs é equipada com, pelo menos, uma câmera de vídeo e luzes. Equipamentos adicionais são comumente adicionados para expandir as capacidades do veículo. Estes podem incluir sonares, magnetômetros, câmera fotográfica, braço manipulador, cortador, ou que possua capacidade de coletar amostra mineral, amostradores de água, além de outros instrumentos que podem medir a turbidez da água, a penetração de luz e a temperatura (EGOROV et al., 2012).

Figura 8 – Veículo operado remotamente (ROV)³

4.1.2.3 Veículos Subaquáticos Autônomos (*Autonomous Underwater Vehicles – AUV*)

Os AUVs (Figura 9) são robôs que viajam sob a água sem a necessidade de um operador para guiá-lo. Eles são equipados com sonda de eco e vários sensores que medem a concentração de vários elementos e compostos químicos, absorção e reflexão da luz, além da presença de vida microscópica. Além disso, os AUVs podem rebocar outros veículos e depositar sensores ou outros equipamentos em regiões específicas no fundo do mar (EGOROV et al., 2012).

Stevenson e Plunkett (2012 apud EGOROV et al., 2012) destacam o uso de AUVs no Projeto Nautilus, que com bastante eficiência têm realizado pesquisas e mapeamentos em campos de chaminés de sulfetos a nordeste de Lau Basin (Toga), desde novembro de 2011.

³ Veículo operado remotamente (ROV). Disponível em: <<http://www.eca-robotics.com/photo/ecatalogue/596-1.jpg>>. Acesso em: 24 set. 2013.

Figura 9 – Veículo subaquático autônomo (AUV)⁴

4.1.2.4 Sondagem com Vibracore

O método de sondagem com Vibracore (Figura 10) é um método moderno utilizado para amostragem de sedimentos, pesquisa de jazidas minerais e amostragem ambiental. É um procedimento eficiente e versátil para a obtenção de testemunhos em sedimentos consolidados saturados de água de zonas úmidas, portos, lagos e do mar profundo. É composto por um dispositivo de vibração (*vibracorer*), uma torre e um tubo amostrador de alumínio. O equipamento é lançado na água e, ao tocar o fundo do mar, o dispositivo de vibração é acionado, fazendo com que o tubo amostrador penetre no material a ser coletado. Após a coleta, o equipamento é içado ao barco. Desta forma, uma malha de perfuração pode ser executada com ajuda de GPS e batímetros para determinação da altura da lâmina d'água.

⁴ Veículo subaquático autônomo (AUV). Disponível em: <<http://robotics.ee.uwa.edu.au/auv/pic/usal/usal-submarine.jpg>>. Acesso em: 24 set. 2013.

Figura 10 – Equipamento Vibracore sendo lançado ao mar⁵

4.1.2.5 Exploração por Ecobatimetria

Segundo Egorov et al. (2012), tanto a profundidade da água quanto os dados do fundo do mar em águas profundas podem ser coletados utilizando as tecnologias existentes dos atuais ecobatímetros.

Os ecobatímetros utilizam pulsos sonoros para avaliar a profundidade da coluna d'água. O intervalo entre a emissão de um impulso e a recepção de seu eco é gravado e a profundidade da água é calculada a partir da velocidade de propagação do som através da água, previamente conhecida. Para esta finalidade, existem dois tipos principais de ecobatímetros: ecobatímetro de feixe único (*single-beam echo sounder* - SBES) e ecobatímetro de múltiplos feixes (*multi-beam echo sounder* - MBES).

A Figura 11 apresenta uma ilustração de uma embarcação equipada com um ecobatímetro de múltiplos feixes, que possibilita a determinação da profundidade da água. Ecobatímetros de feixe único possuem um único transceptor que emite uma série de ondas de som e detecta seus ecos resultantes, produzidos durante a incidência vertical dos feixes no fundo do mar. Os ecobatímetros de múltiplos feixes

⁵ Vibracore. Disponível em: <http://www.qresources.com.au/3mtower_2.gif>. Acesso em: 24 set. 2013.

possuem vários transceptores que enviam as ondas de som em vários ângulos em direção ao fundo do mar. Portanto os ecobatímetros de múltiplos feixes apresentam resultados mais precisos.

Figura 11 – Ilustração de uma embarcação equipada com ecobatímetro de múltiplos feixes

Fonte: Egorov et al. (2012).

4.1.2.6 Exploração Eletromagnética

Para pesquisas em águas profundas pode-se utilizar o método da exploração eletromagnética (Figura 12), que se subdivide em dois tipos:

- a) CSEM (*Controlled Source Electromagnetic*) – sondagem que utiliza uma fonte emissora de ondas eletromagnéticas;
- b) MT (*Magnetotelluric*) – sondagem magnetotelúrica.

Figura 12 – Ilustração da técnica de sondagem eletromagnética

Fonte: Egorov et al. (2012).

Segundo Egorov et al. (2012), na sondagem CSEM, um poderoso dipolo elétrico é rebocado horizontalmente a cerca de 30 metros acima do assoalho marinho. Esta fonte transmite um sinal eletromagnético de baixa frequência, cuidadosamente selecionado para a subsuperfície. Uma rede de receptores posicionada no fundo do mar mede a energia de propagação na água e no subsolo. Após o processamento dos dados, modelamento e testes de inversão, volumes de resistividade em 3-D são gerados. Estes resultados são integrados com outras informações de subsuperfície e geram informações confiáveis para as operações de perfuração subsequentes.

A sondagem magnetotélúrica (MT) é similar à CSEM. Ela é sensível a corpos resistivos na subsuperfície. Sondagem submarina por MT mapeia variações de resistividade na subsuperfície pela medição dos campos elétricos e magnéticos naturais do subsolo marinho. As ocorrências naturais de campos elétricos e magnéticos são geradas pelas interações dos ventos solares com o campo magnético da Terra (quando são fortes, são conhecidas como tempestades geomagnéticas). Como a fonte emite ondas de baixa frequência, pode-se atingir boas profundidades de penetração.

Sinha et al. (1990) citam que, devido à natureza da emissão de ondas em baixa frequência e à alta sensibilidade da técnica MT, são obtidos excelentes resultados de mapeamento e interpretação da geologia regional. A técnica MT não

possui a mesma sensibilidade que os sensores horizontais da técnica CSEM, porém podem penetrar em camadas mais espessas, pois as técnicas CSEM e sísmicas têm maiores dificuldades de penetração.

4.1.3 Métodos de extração de material subaquático

Prelúdio

Esta seção, reconhecidamente extensa, reúne os principais métodos para extração de materiais subaquáticos. A opção do autor em manter esta seção na íntegra baseia-se em um dos objetivos desta Tese, ou seja, reunir em um único lugar textos relativos à mineração submarina.

A técnica mais conhecida de extração de material subaquático ainda é a de dragagem. Segundo Oliveira (2010), esta técnica vem evoluindo desde a antiguidade. Alguns trabalhos de dragagem datam de 5000 anos antes de Cristo, quando os sumérios abriram canais para ampliar sua navegação (MARTINS, 1974). Operações de dragagem foram utilizadas para realizar a abertura do Canal da Babilônia, unindo os Rios Tigre e Eufrates, determinada por Nabucodonosor em 600 a.C. Também foi necessário realizar operações de dragagem durante a construção do Grande Canal da China, a pedido do soberano Fu Chai, cujas obras se iniciaram no ano de 486 a.C. e terminaram em aproximadamente 1280 d.C. (BRAY; BATES; LAND, 1997). Hoje, o Grande Canal da China é considerado o maior rio artificial do mundo, com 1.776 km de extensão.

Atualmente, as operações de dragagem ainda são importantes e amplamente utilizadas devido a seu relativo baixo custo e por ser uma técnica amplamente conhecida. Porém, esta técnica se mostra limitada quando as profundidades aumentam, surgindo os desafios para extração mineral, em regiões abissais por exemplo.

De acordo com Agarwal et al. (2012), torna-se óbvio este desafio, devido às altas pressões hidrostáticas em grandes profundidades (4.000 a 6.000 m), assim como a posterior transferência do material escavado para a superfície.

Serão apresentadas a seguir algumas possíveis técnicas para exploração mineral oceânica/submarina.

4.1.3.1 Dragagem convencional: dragagem por sucção

Dragas de sucção são embarcações concebidas para sugar material subaquático através de diferença de pressão. Bombas são ligadas a braços de arrasto que transportam o material extraído, depositando-o no interior do navio (GÓIS FILHO, 2004). A carga de material extraído pode então ser transportada para seu destino, podendo ser sua deposição em:

- a) Outra região subaquática: neste caso o material é deixado cair pela parte inferior do casco, através de aberturas geometricamente posicionadas;
- b) Um local deposicional em terra, como praia ou área de recuperação, onde o material é bombeado para terra pelo navio;
- c) Um local intermediário (pilha), podendo o material ser retomado para aproveitamento ou beneficiamento.

Este método é mais adequado para quando se deseja escavar material inconsolidado em áreas abertas para entrega em um local de deposição distante. Uma limitação do método é a perda de minerais pesados.

Estes tipos de embarcações são geralmente certificados para navegar no litoral ou águas oceânicas e são adequadas para trabalhar em condições extremas do mar. A Figura 13 apresenta uma embarcação típica que opera extraindo areia com draga de sucção.

Figura 13 – Vista esquemática de uma embarcação operando com dragagem de areia por sucção⁶

4.1.3.2 Dragagem convencional: dragas de corte e sucção

Dragas dotadas com cabeça rotativa (Figura 14) são embarcações (ou plataformas flutuantes) equipadas com um cortador rotativo hidráulico que escava o fundo do mar. Um dispositivo alimenta o material escavado em um tubo e um sistema de bombeamento transporta a polpa para distâncias de até 9 km (cinco milhas náuticas). Distâncias de transporte maiores podem ser obtidas pela adição de bombas de reforço (*booster*) na rota da tubulação.

Este método é mais adequado (econômico) quando o local de deposição está a uma distância de aproximadamente 11 km (6 milhas náuticas) do local da dragagem. Essas dragas podem bombear todos os tipos de materiais em suspensão: lama, areia, argila e rocha. A capacidade para dragar material rígido, duro ou tenaz é dependente do tamanho e peso do equipamento de dragagem e da potência instalada do cortador. Uma limitação do método é a capacidade de bombear o material pesado, que é dependente da potência instalada e o tamanho do

⁶ Dragagem de sucção. Disponível em: <http://www.cedd.gov.hk/eng/about/organisation/chapter_11/qplate13_1a.html>. Acesso em: 23 set. 2013.

sistema de bombeamento (pode ocorrer perda de minerais pesados durante a operação).

Figura 14 – Detalhe da ferramenta de corte de rocha⁷

4.1.3.3 Dragagem convencional: dragas autopropelidas de arrasto

Segundo Góis Filho (2004), as dragas do tipo autopropelidas de arrasto (Figura 15) são constituídas por um casco de navio dotado de porões que recebem o material succionado do fundo do mar por bombas hidráulicas. Essas bombas são conectadas aos tubos de sucção que possuem, em sua extremidade, uma boca de dragagem de cujos formatos são selecionados em função do tipo de material que se vai dragar. O descarregamento dos porões pode ser composto por portas de fundo ou por um sistema de bombeamento.

As portas de fundo mais usuais são as compostas por válvulas de formato cônico, sendo suas aberturas acionadas a partir da cabine de comando das dragas, no momento da descarga.

⁷ Ferramenta para corte de rocha. Disponível em: <<https://www.dredgepoint.org/dredging-database/equipment/raffay>>. Acesso em: 24 set. 2013.

As dragas autopropelidas de arrasto atuais têm alto grau de manobrabilidade, sendo dotadas de hélices transversais na proa, permitindo que, quando em movimento de giro, ocupe um mínimo de espaço.

Esse tipo de draga conta ainda com um avanço tecnológico importante, o compensador de onda (*swell compensator*), que mantém constante a tensão nos cabos que sustentam os tubos de sucção, permitindo a continuidade das operações, mesmo em locais onde haja fortes ondulações. Outro avanço nestes tipos de dragas é o aumento da capacidade de armazenamento de carga.

Figura 15 – Draga autopropelida de arrasto realizando extração submarina de areia⁸

4.1.3.4 Dragagem convencional: dragagem mecânica

De acordo com Góis Filho (2004), a escavação também pode ser realizada por meio de dragas equipadas com escavadeiras mecânicas. Geralmente são plataformas flutuantes que abrigam uma grua robusta contendo um sistema de cabos de aço que suportam a caçamba que realiza a escavação no fundo do mar. A draga se posiciona no local da dragagem e se fixa no fundo do mar baixando pilares de aço retráteis e permanece nesta posição durante toda a operação. O material

⁸ Draga autopropelida de arrasto. Disponível em: <<http://images-en.busytrade.com/83755200/Sell-7000m3-Self-propelled-Trailing-Suction-Hopper-Dredger-ccs-.jpg>>. Acesso em: 24 set. 2013.

escavado é carregado em barcaças, sendo o transporte até a área de descarregamento realizado com ajuda de rebocadores.

Este método é mais adequado para a escavação de materiais em áreas restritas, trabalhando em torno de obstáculos e também na situação em que a região de descarregamento esteja em distâncias longas, além das usualmente utilizadas por bombeamento. Geralmente o material dragado é eliminado em outra região do oceano abrindo-se a parte inferior do casco. Se o material tiver que ser descarregado em terra, um descarregador de barcaça pode ser usado para bombear o material para fora das barcaças.

Dragas mecânicas se apresentam em uma grande variedade de tipos, cada uma envolvendo a utilização de garra ou caçamba para escavar o material *in situ* e transportá-lo para a superfície (SOUZA, 1999).

4.1.3.5 Dragagem convencional: escavadeiras frontais (*Dipper Dredges*)

As escavadeiras frontais (Figura 16) são constituídas por caçambas voltadas para frente do braço rígido ao qual são articuladas, construídas sobre pontões flutuantes. São praticamente uma versão adaptada para a dragagem das pás escavadeiras, amplamente utilizadas em mineração ou terraplanagem (GÓIS FILHO, 2004).

Figura 16 – *Dipper Dredge*⁹

⁹ *Dipper Dredge*. Disponível em: <http://www.dredgebrokers.com/HTML/Dredging/article-images/Panama_Canal_Bucket_Dredge.jpg>. Acesso em: 24 set. 2013.

4.1.3.6 Dragagem convencional: *dragline* ou draga de pá de arrasto

Segundo Góis Filho (2004), a *dragline* (Figura 17) é constituída por uma pá (caçamba) de aço suspensa à ponta de um caboflexível, ligado a um guindaste móvel. A pá é lançada para frente por movimento circular do guindaste e, após “morder” o solo, é içada pelo cabo em direção ao guindaste, escavando o solo que se deseja remover.

Figura 17 – *Dragline*

Fonte: Oliveira (2010).

4.1.3.7 Dragagem convencional: draga de roda de caçamba (*Bucket Wheel*)

A draga de roda de caçamba (Figura 18) é um equipamento que opera fixado por âncoras e cujo dispositivo de dragagem se move em movimentos de semicírculos, guiado por guinchos. A draga de caçamba é um dos mais antigos equipamentos de dragagem. Ele possui um sistema de correntes sem fim guiando a caçamba que enche enquanto raspa o fundo do rio, lago ou mar. A caçamba é esvaziada ao longo de seu movimento ascendente, quando viradas de cabeça para baixo, retornando para dentro da água. O material dragado é carregado em barcaças (GÓIS FILHO, 2004).

Figura 18 – *Bucket Wheel*¹⁰

4.1.3.8 Dragagem convencional: dragas com elevadores de caçambas ou de Alcatruzes

As dragas equipadas com elevadores de caçambas (Alcatruzes) também são equipamentos utilizados há muitos anos. Elas geralmente possuem um casco retangular com uma cavidade central em que uma estrutura de aço ou escada está suspensa. O elevador suporta uma corrente sem fim de canecas (caçambas), cada uma das quais está equipada com uma aresta de corte. A minoria deste tipo de draga é autopropelida, sendo o mecanismo de propulsão utilizado para mover o barco diferente do maquinário utilizado para realizar a extração (EUROPEAN DREDGING ASSOCIATION, 2013).

A dragagem começa quando uma caçamba atinge a parte inferior da cadeia, coincidindo com o leito onde se quer escavar. A caçamba executa a ação de escavar e coletar o material que é transportado para o topo da cadeia, onde ocorre a inversão da posição da caçamba e o material é descarregado, caindo em um chute que o leva, geralmente a um barco que fica ancorado ao longo da draga. Cada

¹⁰ *Bucket wheel*. Disponível em: <http://qzyongsheng.en.alibaba.com/product/1082793705-200633006/Bucket_wheel_suction_dredger.html>. Acesso em: 25 maio 2014.

segmento, em seguida, retorna vazio para a parte inferior da cadeia, onde o ciclo é reiniciado. O tamanho de uma draga de caçambas é normalmente descrito pela capacidade das caçambas, estando na faixa de 100 - 900 litros.

Dragas de caçamba são capazes de dragar quase todo o material até ao ponto em que é necessário realizar detonação. Se a draga estiver equipada com dente de escarificação, pode ainda ser capaz de escavar diretamente algum tipo de rocha mais friável. É necessário adicionar uma quantidade mínima de água para retirada do material das caçambas. Isto é vantajoso na redução de custos de produção, especialmente quando o material dragado é lama ou silte.

Para realizar a operação, a draga é posicionada exatamente no local onde será realizada a escavação e fixada por um sistema de até seis âncoras ou amarras; a cadeia de caçambas é movida de um lado para outro para escavar o material. Os principais problemas deste tipo de operação são que as linhas de amarração podem obstruir e atrapalhar a navegação de outras embarcações e o nível de ruído é muito alto, sendo necessário tomar medidas para controlar as emissões sonoras. Grande parte da energia da draga é utilizada para realizar o movimento da cadeia de canecas, mas a elevada inércia do sistema pode favorecer para escavar pontos onde o material está mais consolidado. Geralmente este tipo de operação de dragagem controla o nível de produção por metros cúbicos extraídos por semana. As produções semanais podem atingir de 10.000 a 100.000 m³ (*in situ*), dependendo do tamanho da draga, localização e tipo de material. As profundidades máximas atingidas pelas dragas de caçamba ficam, normalmente, em torno de 20 metros. As dragas com elevadores de caçambas são equipamentos complexos e de alto custo de operação, mas podem dragar com bastante precisão nas profundidades requeridas, além da grande vantagem de não perderem minerais pesados durante a operação.

A Figura 19 apresenta uma draga equipada com elevadores de caçambas em operação marinha.

Figura 19 – Detalhe de uma draga de Alcatruzes em operação

Fonte: Dredge Point (2013).

4.1.3.9 Dragagem convencional: draga de garra

A draga de garra é um equipamento estacionário, fixado por âncoras ou por pilares retráteis de aço. A operação de dragagem é realizada por duas meia conchas que são operadas por sistema de cabos eletro-hidráulicos. A garra pode ser montada na própria draga ou sobre uma retroescavadeira hidráulica. Muitas variações geométricas podem ser encontradas nas garras, sendo o principal aspecto

sua forma de abertura. A draga de garra é utilizada tanto em instalações portuárias, quanto em águas profundas, sendo o material dragado carregado em barcaças.

Este tipo de draga também pode ser chamada de *clamp shell* e pode tanto trabalhar sobre plataformas flutuantes quanto em barcaças autopropelidas, este último tipo geralmente possui uma moega dentro da barcaça que recebe o material escavado. A do tipo plataforma flutuante possui um casco retangular no qual é montado um guindaste que suporta a garra. A operação de extração é realizada pelo afundamento da garra para o fundo do leito a ser dragado. Quando a garra atinge o material, esta é fechada, aprisionando o material em seu interior e levantada até a superfície, onde é realizado o descarregamento, na própria barcaça, ou em área adjacente. O tamanho deste tipo de draga é determinado pela capacidade da concha, que pode variar entre 1 e 20 m³, dependendo da potência do guindaste. A Figura 20 mostra uma draga de garra em operação marinha.

Figura 20 – Dragagem de garra em operação

Fonte: Penta-Ocean Construction (2013).

A draga de garra autopropelida é basicamente um navio que possui um ou mais guindastes com garras de dragagem montadas ao redor de um *hopper* de

recebimento de material. Ela pode ser facilmente deslocada de um local para outro pelos seus próprios motores e também tem a capacidade de transportar o material extraído para a área de destino. O tamanho deste tipo de draga é expresso em função da capacidade do *hopper* e pode variar de 100 a 2.500 m³. As embarcações menores possuem um único guindaste, mas algumas das embarcações maiores podem embarcar até quatro guindastes. O nível de produção depende do tamanho do sistema de guindaste/garra, da profundidade da água, e no caso desta versão autopropelida depende ainda da distância do local de extração para o local de deposição do material.

Geralmente, este tipo de draga é posicionada na região exata onde será realizada a dragagem e fixada por meio de amarras ou âncoras; em algumas situações específicas, ela pode estar equipada com pilares retráteis que são lançados ao fundo do mar ou rio, fixando a draga, quando esta estiver em funcionamento.

O mecanismo de garras movimentadas por cabos de aço geralmente produz um perfil de fundo irregular, com altos e baixos e, portanto este tipo de equipamento é mais indicado para escavação de grandes volumes. A draga de garra é uma máquina relativamente simples e de baixo custo e funciona melhor em sedimentos consolidados de silte e argila, e sedimentos inconsolidados de areia. As versões maiores e mais robustas são apropriadas para a remoção de lixo, antigas pilhas de deposição, entulhos e outros obstáculos. Estas dragas também são muito eficientes na remoção de material próximo a paredes de portos, cais e em cantos de docas e bacias, que geralmente são de difícil acesso.

Uma draga deste tipo pode ser construída de forma rápida e econômica, através de equipamentos terrestres convencionais, seguramente fixadas em plataformas e geralmente desempenham serviços pontuais ou de curto prazo; o ponto de atenção, neste caso, deve ser da estabilidade do conjunto.

4.1.3.10 Dragagem convencional: draga com retroescavadeira

É um tipo de draga estacionária, fixa por âncoras, amarras ou por pilares. Este tipo de pilar (*spud*, em inglês) é um dispositivo robusto que ancora o navio através de movimentos rotacionais ao redor do local de ancoragem (o *spud* também

pode ser utilizado em outros tipos de dragas). Pequenas dragas com retroescavadeira podem ser posicionadas sobre bancadas acima de valas. A draga com retroescavadeira é um equipamento hidráulico, equipado com uma meia-concha aberta. A concha é carregada com o material através do movimento do braço que a sustenta e normalmente descarregada em barcaças. Este tipo de equipamento é geralmente utilizado em portos e em regiões de águas rasas.

Essas operam de forma mais eficiente do que as escavadeiras tipo *shovel*. O tamanho de uma draga com retroescavadeira é descrito pela capacidade da caçamba, que pode variar entre 0,5 e 13 m³. A produção é dependente do tamanho da caçamba e da tenacidade/dureza do material. Devido às elevadas cargas horizontais provocadas pelo movimento da escavadeira, as dragas equipadas com retroescavadeiras geralmente trabalham apoiadas em pilares (*spuds*). Geralmente dois *spuds* montados nas extremidades da plataforma são suficientes para dar estabilidade à draga, permitindo um bom controle operacional, tanto horizontal quanto vertical da escavadeira. Como a caçamba é pesada e relativamente rígida, cuidados especiais são necessários para evitar danos, caso o trabalho seja realizado próximo a paredes de portos e forros de canais.

A Figura 21 apresenta um desenho esquemático de uma draga equipada com retroescavadeira.

Figura 21 – Esquema de draga com retroescavadeira

Fonte: Vlasblom (2013).

4.1.3.11 Dragagem convencional: “escavadeira flutuante”

No mercado de veículos flutuantes, podem aparecer modelos não convencionais equipados com escavadeiras, como é o caso do Marsh Excavator, produzido pela Marsh Buggies Incorporated. A Figura 22 apresenta uma destas máquinas, um veículo flutuante capaz de operar em terra, água, neve, lama, regiões pantanosas, etc.

Figura 22 – Marsh Excavator¹¹

4.1.3.12 Dragagem convencional: dragas com escavadeira *Shovel*

As dragas equipadas com escavadeira tipo *Shovel* (Figura 23), assim como as equipadas com retroescavadeiras consistem em uma plataforma retangular, sobre a qual é montada a unidade de escavação. A escavadeira pode ser uma parte integral da draga ou um equipamento móvel adaptado sobre ela. O material é escavado utilizando uma caçamba de tamanho compatível com a resistência *in situ* do material a ser dragado. O material escavado é carregado em barcaças ou

¹¹ Marsh Excavator. Disponível em: <<http://marshbuggies.com/gallery.html>>. Acesso em: 27 abr. 2014.

colocado em terra. O tipo mais antigo deste tipo de draga utilizava um cabo para operar integralmente a unidade escavadora (frontal ou retro), sendo este cabo extremamente robusto, dimensionado para permitir dragagem de materiais duros e tenazes, como obras de alvenaria e rochas não detonadas.

As dragas equipadas com escavadeira operada por cabos já foram em grande parte substituídas por retroescavadeiras operadas hidraulicamente.

Figura 23 – Esquema de dragagem com escavadeira tipo *Shovel*

Fonte: Vlasblom (2013).

4.1.3.13 Outros métodos: dragagem hidrodinâmica por injeção de água (*Water Injection Dredging – WID*)

O sistema de dragagem hidrodinâmica (WID) é um tipo de desmonte hidráulico que utiliza injeção de água e é usado geralmente em marinas e portos estreitos e rasos. As dragas tipo WID (Figura 24) são projetadas para ter boa manobrabilidade e podem trabalhar próximas a aterros e muros do cais (VAN OORD, 2013).

Utiliza um sistema de bombeamento com bicos injetores alinhados horizontalmente e é caracterizada pela ação de um jato água de baixa pressão e grande volume contra os sedimentos de fundo, fluidificando-os e gerando um efeito pluma próximo ao leito (INTERNATIONAL ASSOCIATION OF DREDGING COMPANIES, 2013).

Figura 24 – Dragagem por injeção de água (WID)

Fonte: Dredging Today (2013).

4.1.3.14 Outros métodos: dragagem pneumática (*Air Lift*)

Este tipo de dragagem promove a sucção do material dragado por ação de injeção de ar comprimido (Figura 25).

As dragas pneumáticas não provocam dispersão acentuada de sedimentos na lâmina d'água durante sua operação, uma vez que não há a presença de cortes no solo por meios mecânicos. Desta forma, as dragas pneumáticas podem ser consideradas de baixo potencial de impacto ambiental. São empregadas em atividades de recuperação ambiental (retirada de produtos químicos insolúveis, ou pouco solúveis em água; materiais mais pesados que a água, como, por exemplo, tetracloreto de carbono e dissulfeto de carbono). Uma característica vantajosa da dragagem pneumática em relação à hidráulica é a não limitação da operação pela profundidade de sucção (OLIVEIRA, 2010).

Figura 25 – Esquema de uma dragagem pneumática

Fonte: Soares (2006).

4.1.3.15 Outros métodos: equipamentos flutuantes de lavra

Existem vários tipos e formas de equipamentos flutuantes de extração, como plataformas e embarcações móveis. São amplamente utilizados na indústria de petróleo e gás e não serão detalhadas neste trabalho.

Os tipos mais usuais para extração de material em águas profundas são apresentados na Figura 26 e incluem: *Spar*, *Tension Leg Platform* (TLP), *Semisubmersible and Floating Production, Storage and Offloading* (FPSO). Operam de formas distintas, dependendo da profundidade da água e dos pesos das instalações (BELL; CHIN; HANRAHAN, 2005).

Figura 26 – Principais tipos de equipamentos flutuantes de extração em águas profundas

Fonte: Arnold (2007).

A tecnologia utilizada no sistema de tubos flexíveis para transporte do material extraído à superfície é bastante avançada e é aplicada desde a década de 1970. Estes tubos possuem flexibilidade suficiente para suportar os movimentos da unidade flutuante. A característica essencial de um tubo ascendente flexível é a sua rigidez axial e alta flexão relativa (EGOROV et al., 2012). A Figura 27 ilustra uma seção típica de um tubo flexível utilizado para transportar material retirado do fundo do mar para a superfície.

Figura 27 – Seção típica de um tubo flexível para elevação de material extraído do fundo do mar

Fonte: Bai e Bai (2010)

4.1.3.16 Outros métodos: bombas multifuncionais submersas

Uma gama de diferentes bombas subaquáticas é utilizada há décadas pelo homem. Não é foco deste estudo apresentar os vários modelos de bombas submergíveis existentes, porém será apresentado a seguir um tipo inovador de bomba submersível que poderá ser analisada futuramente para a lavra submarina. Trata-se de uma bomba denominada DOP[®] (Figura 28) produzida pela Damen Dredging Equipment. Suas principais aplicações são:

- a) Mineração ou dragagem de areia e cascalho;
- b) Pequenas operações de dragagem para manutenção em portos e canais;
- c) Dragagens em áreas restritas;
- d) Descarregamento de silos de embarcações;
- e) Suspensa em estrutura para sucção em profundidades de até 50 metros;
- f) Montada sobre uma estrutura de corte típica de dragagem;
- g) Utilizada como uma estação booster móvel;
- h) Dragagem ambiental de materiais contaminados.

Figura 28 – Bomba DOP®

Fonte: Damen Dredging Equipment (2011).

De acordo com Damen Dredging Equipment (2011), este tipo de bomba pode descarregar o material dragado em até 1.000 metros de distância operando com apenas uma bomba, tem estrutura robusta e pode ser adaptada em função da necessidade da operação. A bomba DOP® pode operar em profundidades de até 500 metros e tem capacidade de dragagem que varia de 200 a 4.000 m³/h dependendo do tamanho e modelo da bomba.

Estão disponíveis em cinco diferentes tipos que podem ser escolhidos de acordo com a utilização. A Figura 29 apresenta desenhos esquemáticos desses tipos.

Figura 29 – Tipos de Bomba DOP®

Fonte: Damen Dredging Equipment (2011).

Legenda:

- Tipo A: indicada para produção de areia, equipada com bicos e tubulação para injeção de água. Operam suspensas e possuem alta capacidade de produção.
- Tipo B: possui cabeça com fundo plano, é equipada com tubo de jato de água e anel ao redor da cabeça. Especialmente projetada para trabalhar em fundo de áreas restritas.
- Tipo C: possui uma unidade cortadora para areia compactada. Pode ser fixada em guindaste ou estrutura típica cortadora.
- Tipo D: possui cabeça em forma de pá e foi projetada para limpeza e nivelamento de trincheiras de trabalho.
- Tipo E: possui cabeça com trado, especialmente projetada para se obter uma dragagem precisa, por exemplo, na dragagem ambiental de sedimentos poluídos ou contaminados.

4.1.3.17 Outros métodos: coletores

Os coletores são utilizados basicamente para lavra em ambiente profundo, visando aproveitamento de nódulos polimetálicos.

a) Coletores passivos

Os coletores passivos (*Passive Collectors*) têm um *design* simples, não necessitando de alimentação adicional, oferecendo as vantagens mais óbvias sobre coletores ativos: baixo custo e simplicidade. No entanto, os coletores passivos têm desvantagens, incluindo a falta de controle na quantidade e qualidade do material escavado, produz forte efeito pluma, além de não ter capacidade de evitar que sedimentos contaminantes também sejam coletados (BROCKETT, 1999).

A maioria dos coletores passivos têm duas funções principais: recolher e agrupar o material para uma entrada e arrastá-los para o tubo elevador. O equipamento ao ser rebocado pelo fundo do mar faz com que a água force a entrada

do material pelo duto (BROCKETT, 1999). Basicamente se dividem em Romboide (Figura 30) e Híbrido (Figura 31).

Figura 30 – Coletor passivo do tipo Romboide

Fonte: Brockett (1999).

Figura 31 – Coletor passivo do tipo híbrido

Fonte: Brockett (1999).

b) Coletores ativos

Ao contrário de coletores passivos, os coletores ativos necessitam de uma fonte de alimentação elétrica para desempenhar a função básica de coleta e pré-processamento do material. Eles podem ser divididos em três tipos básicos: sistemas mecânicos puros, sistemas hidráulicos puros e sistemas híbridos (combinação entre os dois sistemas). O projeto de coletores ativos é mais complexo

do que os passivos, sendo que neles já se executa uma etapa preliminar de processamento. Também é possível trabalhar com materiais mais grosseiros, sendo necessário acoplar um britador ao coletor ativo (BROCKETT, 1999).

c) Coletor ativo mecânico

O sistema mecânico puro (Figura 32) possui partes móveis para coletar e transportar o material até o sistema que fará seu transporte até a superfície. O consumo de energia de um sistema de coletor ativo mecânico é superior a um sistema hidráulico (BROCKETT, 1999). Devido à sua complexidade e pelo uso de partes móveis, este tipo de sistema é menos confiável e de uso limitado.

Figura 32 – Coletor ativo mecânico

Fonte: Brockett (1999).

d) Coletor ativo hidráulico

O sistema hidráulico puro é o mais popular em termos de coleta de nódulos polimetálicos. É mais confiável e robusto que o sistema mecânico puro, devido ao menor número de partes móveis e também pela natureza menos complexa de como o equipamento opera. Este sistema também tem menos contato com o leito marinho, reduzindo os impactos ambientais. Enquanto o sistema mecânico utiliza partes móveis para separar a camada de nódulos dos sedimentos do fundo do mar, o sistema hidráulico utiliza o movimento da própria água para realizar este serviço (BROCKETT, 1999).

Eles podem ser de dois tipos: rampa hidráulica e elevador hidráulico.

e) Rampa hidráulica

A rampa hidráulica (Figura 33) apenas escarifica o leito marinho, não removendo a camada de sedimento. Após a remoção dos nódulos, jatos de água executam um pré-processamento, enviando os nódulos ao sistema de transporte à superfície, enquanto possíveis sedimentos são devolvidos ao leito (BROCKETT, 1999).

Figura 33 – Rampa hidráulica

Fonte: Brockett (1999).

f) Elevador hidráulico

Semelhante à rampa hidráulica, o elevador hidráulico utiliza um dispositivo para transportar e pré-processar os nódulos antes de conduzi-los ao sistema de elevação à superfície. A única diferença é que o elevador hidráulico não entra em contato direto com o fundo do mar durante a lavra, uma vez que utiliza bocais alinhados para produzir baixa pressão e levantar os nódulos do fundo do mar, coletando-os. Na verdade, o contato com o fundo do mar é apenas através de uma placa curva, que serve para alinhar o fluxo do jato da água produzida com a entrada da rampa (BROCKETT, 1999). Uma representação esquemática do elevador hidráulico é apresentada na Figura 34.

Figura 34 – Elevador Hidráulico

Fonte: Brockett (1999).

g) Coletor ativo híbrido

A combinação de um sistema mecânico e hidráulico foi desenvolvida, já que o sistema mecânico puro é considerado menos eficaz na realização da separação entre o nódulo e o sedimento. A adição de um sistema hidráulico incorpora bocais de água de alta velocidade para lavar os sedimentos e separá-los dos nódulos. Existem basicamente três exemplos de sistema híbrido: tambor mecânico, elevador híbrido simples e arado hidráulico (BROCKETT, 1999).

h) Tambor mecânico

O tambor mecânico possui uma série de pequenas caçambas montadas sobre um tambor, que gira à medida que se desloca horizontalmente. Como resultado da rotação, toda a camada superior do leito marinho (sedimentos e nódulos) é coletada. Bocais injetam fluxos de água em alta velocidade, separando os sedimentos dos nódulos, levando-os através de transportador de correia até um sistema de britagem primária, antes de transferi-los ao sistema de elevação para a superfície (BROCKETT, 1999).

Um diagrama esquemático deste sistema é apresentado na Figura 35.

Figura 35 – Tambor mecânico

Fonte: Brockett (1999).

i) Elevador híbrido simples

O elevador híbrido simples utiliza um mecanismo hidráulico para coletar os nódulos e métodos mecânicos para transportar, pré-processar (lavar), britar e transportá-los para o sistema de elevação à superfície. Sistemas hidráulicos, tais como injeção de jatos de água, são usados para elevar os nódulos acima do leito do mar. Um sistema de vibração fica acoplado ao sistema de transporte mecânico para executar o processo de separação do nódulo-sedimento. Os nódulos separados caem no britador para realizar a cominuição das partículas maiores. A vantagem deste conceito é que requer o mínimo de contato entre o coletor e o fundo do mar. No entanto, a desvantagem é que o efeito pluma gerado pode ser significativo (BROCKETT, 1999). Uma representação esquemática do elevador híbrido simples é apresentada na Figura 36.

Figura 36 – Elevador híbrido simples

Fonte: Brockett (1999).

j) Arado hidráulico

O arado hidráulico também tem uma rampa como mecanismo para o transporte dos nódulos limpos até o sistema de elevação. A diferença está na técnica usada para cortar a camada do fundo do mar, sendo que o arado hidráulico utiliza uma placa na extremidade da rampa para escarificar o material. O topo dos nódulos precisa estar alinhado com a parte inferior da placa. Com o movimento do arado hidráulico, ocorre a escarificação dos nódulos, juntamente com sedimentos do fundo do mar. Na sequência, jatos de água são injetados para promover a separação (limpeza) dos nódulos e transportá-los ao longo da rampa inclinada (BROCKETT, 1999). Uma representação esquemática do arado hidráulico é apresentada na Figura 37.

Figura 37 – Arado hidráulico

Fonte: Brockett (1999).

Pode-se concluir que, entre os dois tipos de coletores, os coletores ativos oferecem menor impacto ambiental e maior eficiência de produção. Dos três tipos de coletores ativos, o sistema mecânico puro tem desvantagens óbvias, pois são equipamentos grandes e pesados oferecendo menor confiabilidade devido às numerosas peças móveis. Assim, o mecanismo híbrido e o hidráulico puro parecem ser os conceitos mais promissores para um sistema de coleta de nódulos (BROCKETT, 1999) atualmente em uso.

4.1.3.18 O Estado da Arte em lavra de mar profundo

Novas tecnologias estão sendo desenvolvidas e recursos de engenharia avançados estão sendo executados para vencer o grande desafio de se lavrar em mar profundo. Altas pressões, ausência de iluminação, corrosão, necessidade de bombear o material lavrado para a superfície, impossibilidade de controle visual, entre outras particularidades podem ser encaradas como dificultadoras ao processo.

A empresa Nautilus Minerals tem conseguido realizar estudos ambiciosos para viabilizar seu projeto Solwara1, na Papua Nova Guiné.

A ideia é desagregar a rocha no assoalho marinho (neste caso, a 1.600 m de profundidade) através de duas grandes máquinas robotizadas que escavam o material em um processo de corte contínuo, mas de uma maneira diferente das conhecidas em minas de carvão, por exemplo (NAUTILUS MINERALS, 2013).

A máquina denominada *Auxiliary Cutter* (AC) (Figura 38) será um equipamento preparatório que trabalhará no material criando bancos para outras máquinas trabalharem. A segunda máquina, *Bulk Cutter* (BC) (Figura 39) tem maior capacidade de corte, mas estará limitada aos bancos criados pela AC. Ambas as máquinas deixarão o material escavado no fundo do mar para ser coletado pela *Collection Machine* (CM) (Figura 40). A CM também é um veículo robusto robotizado que fará o trabalho de coletar o material escavado, como polpa por meio de um sistema de bombeamento interno, enviando o material através de um tubo flexível até os equipamentos que levarão o minério à superfície.

Figura 38 – *Auxiliary Cutter (AC)*

Fonte: Nautilus Minerals (2013).

Figura 39 – *Bulk Cutter (BC)*

Fonte: Nautilus Minerals (2013).

Figura 40 – *Collection Machine (CM)*

Fonte: Nautilus Minerals (2013).

O sistema denominado RALS (*Riser and Lifting System*) é dotado de uma grande bomba (Figura 41) e tubo ascendente rígido (Figura 42), pendurado em uma embarcação (*Production Support Vessel – PSV*) (Figura 43) que envia a polpa até a superfície. O tubo é estendido até o fundo do mar por uma torre (Figura 44), sendo o sistema operado de dentro do navio.

Figura 41 – Sistema de bombeamento

Fonte: Nautilus Minerals (2013).

Figura 42 – Tubo que transporta a polpa até a embarcação de apoio

Fonte: Nautilus Minerals (2013).

Figura 43 – Production Support Vessel (PSV)

Fonte: Nautilus Minerals (2013).

Figura 44 – Torre que sustenta o cabo rígido até o fundo do mar

Fonte: Nautilus Minerals (2013).

Na embarcação de apoio, o minério será pré-processado e enviado para as instalações de beneficiamento em terra firme. A Figura 45 esquematiza o processo de lavra.

Figura 45 – Desenho esquemático do processo de lavra em águas profundas idealizado pela Nautilus Minerals

Fonte: Nautilus Minerals (2013).

4.1.4 Suprimento de energia elétrica

Um ponto importante que deve ser considerado ao se minerar em águas oceânicas profundas, inclusive sob o aspecto ambiental, é com relação ao suprimento de energia elétrica para as mais variadas operações, tais como, abastecimento de veículos subaquáticos autônomos (AUV), equipamentos de extração mineral, sistemas de gerenciamento de frotas, usinas de pré-beneficiamento ou mesmo de beneficiamento mineral, iluminação, instalações

industriais em geral, etc. A utilização de geradores embarcados pode ser estudada, mas dependendo da profundidade das operações pode ser tornar restrita ou não aplicável.

Parada et al. (2012) realizaram um estudo comparativo sobre os diferentes tipos de baterias potencialmente adequadas para uso submarino, indicando suas vantagens e desvantagens. Os resultados encontram-se no Quadro 2.

Quadro 2 – Comparativo entre os tipos de bateria mais comuns para uso submarino

Tipo de Bateria				
	Bateria ácida (chumbo)	Bateria de Ni-MH	Bateria de íon-lítio	Bateria de lítio-polímero (Li-po)
Vantagens	-a de menor custo	-recarga rápida	-Alta densidade de energia (menor que a bateria Li-po)	-a mais alta densidade de energia -fácil de manusear
Desvantagens	-baixa densidade de potência -vazamento de ácido sulfúrico é comum	-baixa eficiência -baixa capacidade -alto custo -possibilidade de explosão (menor que na bateria Li-po)	-alto custo -difícil de manusear -possibilidade de explosão -eletrólitos inflamáveis	-alto custo -possibilidade de explosão -eletrólitos inflamáveis

Fonte: Parada et al. (2012).

A escolha do sistema de abastecimento de energia deve, portanto, levar em consideração a questão ambiental. Baterias com menor custo, mas com possibilidade de vazamentos ou explosões devem ser evitadas. Este tipo de estudo deve ser realizado desde as etapas iniciais do projeto de engenharia.

4.1.5 Aspectos ambientais marinhos

Prelúdio

Um dos aspectos mais importantes abordados nesta Tese é a questão da sustentabilidade na mineração oceânica. Conhecer o ambiente marinho em que se pretende trabalhar, seus habitantes e os impactos que a atividade minerária poderá causar é imperativo. Assim, foi necessário escrever mais uma extensa seção.

De acordo com Souza (2009), milhões de páginas têm sido (e ainda serão) escritas, no Brasil e no mundo, sobre o assunto, abordando-o sob os mais diversos enfoques e títulos, seja como “Desenvolvimento Sustentável” ou “Sustentabilidade” ou, às vezes, “Responsabilidade Social”, desde que Rachel Carson, em seu livro “Primavera Silenciosa” (1962), denunciou o descaso da humanidade como meio ambiente.

Um projeto de mineração oceânica deve, obrigatoriamente, abranger estudos robustos sobre as implicações de se minerar no fundo do mar. Inúmeras espécies coexistem habitando o mar, seja em seu assoalho (bentos), seja na coluna d’água (necton). Além dos impactos possíveis de serem causados nos seres vivos habitantes do mar, diversas alterações no meio podem ocorrer em regiões próximas às atividades minerárias submarinas. Cabe ao minerador estabelecer parâmetros de mitigação dos impactos ambientais causados por sua atividade. Para isso, o conhecimento profundo dos aspectos ambientais é imperativo.

4.1.5.1 Introdução às questões ambientais

Bashir et al. (2012) citam que a pesquisa por recursos minerais para atender o crescimento da demanda global está se dirigindo para ambientes mais profundos do oceano. Recursos minerais, especialmente minerais metálicos, são usados na fabricação de produtos que são cada vez mais necessários para suprir a evolução nas demandas da humanidade. Enquanto a economia do mundo cresce, também aumenta a capacidade da população em comprar produtos de qualidade que melhorem seu padrão de vida. Outros benefícios desses minerais são as suas utilizações na fabricação de produtos que são mais sustentáveis, por exemplo, carros elétricos, geradores eólicos e baterias mais duradouras.

A busca de minerais do fundo do mar é também impulsionada pelo declínio nas reservas minerais continentais e da necessidade adicional de se encontrar recursos para atender a demanda futura (DOYLE; WICKS; NALLY, 2006).

Para Bashir et al. (2012), um grande obstáculo para a exploração de recursos minerais no fundo do mar, especialmente em ambiente de alto mar, sempre foi a limitada tecnologia para acessar tais locais. Equipamentos com grandes capacidades foram construídos para a exploração de hidrocarbonetos em ambientes que há algumas décadas muitos pensavam ser improváveis de se explorar. Novamente, a exploração de minerais do fundo do mar ainda não alcançou um nível de interesse e de investimento que poderia garantir o pleno desenvolvimento destas tecnologias.

Segundo Chung (2009), vários estudos na forma de levantamentos exploratórios foram realizados, porém não há dados relevantes para provar a grande reserva de minerais metálicos depositados no fundo do mar. O volume real das reservas minerais do fundo do mar continua a ser um palpite. A necessidade de expandir a fronteira do conhecimento mineral no fundo do mar se tornou imperativa. O grande desafio está em aumentar o volume das reservas mundiais de bens minerais para suprir o aumento da população humana, como operações sustentáveis e de baixo custo.

4.1.5.2 Estudos ambientais

O estudo ambiental para a mineração submarina deverá abranger duas grandes áreas: a pesquisa sobre o meio ambiente na área de interesse (e sua respectiva área de influência) e os impactos ambientais decorrentes da atividade minerária.

Desta forma, é imperativo que a equipe multidisciplinar que desenvolverá um projeto de mineração oceânica possua também biólogos, oceanógrafos, entre outros profissionais. Devido à especificidade do tema, serão abordados neste trabalho apenas conceitos básicos sobre os oceanos.

4.1.5.3 Estudos Ambientais: definições básicas sobre o ambiente marinho

Segundo Barros (informação pessoal)¹², ambiente marinho pode ser dividido em dois grandes domínios:

- a) Domínio pelágico: que se refere à coluna d'água;
- b) Domínio bentônico, que se refere ao fundo oceânico.

O fundo oceânico é formado por substratos que podem ser consolidados, como rochas, ou inconsolidados, como sedimentos arenosos.

O ambiente pelágico, por sua vez, pode ser dividido em:

- a) Zona nerítica, mais próxima à costa (coluna d'água sobre a plataforma continental, influenciada pela presença de compostos de origem terrígena e ocorrência de luz ao longo de toda a sua extensão);
- b) Zona oceânica (demais áreas).

Mais uma vez, a zona oceânica pode ainda ser subdividida em:

- a) Zona epipelágica: corresponde a zona eufótica;
- b) Zona mesopelágica: estende-se do limite inferior da zona epipelágica até a isoterma de 10 °C;
- c) Zona infrapelágica: corresponde a zona disfótica, onde a intensidade luminosa apesar de perceptível ao olho humano encontra-se abaixo do ponto de compensação fotossintético. Verifica-se notável redução da biomassa planctônica;
- d) Zona batipelágica: estende-se até a isoterma de 4 °C;
- e) Zona abissopelágica: caracterizada pela estabilidade térmica;
- f) Zona hadopelágica: caracterizada pela presença exclusiva de espécies endêmicas.

¹² Apresentação de aula do curso de Oceanografia do Instituto de Biologia Universidade da Bahia (UFBA): "O ambiente marinho, principais divisões e componentes". Disponível em: <http://www.oceanografia.ufba.br/ftp/Introducao_Oceanografia/biologia_2.pdf>. Acesso em: 30 set. 2013.

A Figura 46 ilustra o exposto em relação às principais regiões oceânicas.

Figura 46 – Domínios e principais zonas do oceano

Fonte: Universidade de Coimbra (2013).

4.1.5.4 Estudos Ambientais: definições básicas sobre os seres marinhos

No ambiente pelágico são encontrados dois grupos de organismos, classificados de acordo com a capacidade de locomoção (ORNELLAS, 2003):

- Plâncton;
- Nécton.

Plâncton são organismos que possuem capacidade natatória inferior às forças das marés e correntes marinhas, dispersando-se, portanto, sempre na mesma direção destas. Podem ser tanto vegetais (fitoplâncton, Figura 47) como animais (zooplâncton, Figura 48).

Figura 47 – Fitoplâncton

Fonte: Cultura Mix (2013a).

Figura 48 – Zooplâncton

Fonte: Cultura Mix (2013b).

Nécton, por sua vez, são organismos que nadam ativamente, vencendo as forças cinéticas do meio. Estão entre eles, os peixes ósseos e cartilagosos, mamíferos marinhos, répteis, moluscos, aves marinhas, etc. A Figura 49 apresenta alguns exemplos de nécton.

Figura 49 – Exemplos de nécton¹³

4.1.5.5 Estudos Ambientais: bentos

Os organismos que vivem associados aos fundos marinhos (ambiente bentônico) são chamados de bentos. O termo bentos (do grego arcaico βένθος que significa “profundo”, “profundeza”) foi introduzido pela naturalista e artista alemão Ernst Haeckel (1834 – 1919), também responsável pelo termo “ecologia” (TAGLIAPIETRA; SIGOVINI, 2010).

Os organismos bentônicos marinhos podem ter várias classificações. Entre elas:

Categorias tróficas, ou seja, é relativa à nutrição a que pertence a espécie. Nesta categoria o bentos pode ser subdividido em **fitobentos** e **zoobentos**.

¹³ Nécton. Disponível em: <<https://www.yumpu.com/pt/document/view/28877373/necton-mamaferos-2010-1-instituto-de-biologia-da-ufrj>>. Acesso em: 24 set. 2013.

- a) Fitobentos: são organismos autótrofos, incluindo cianobactérias, microalgas, macroalgas e macrófitos (Confederação Hidrográfica do Ebro, Espanha). A Figura 50 apresenta típicos fitobentos.

Figura 50 – Fitobentos¹⁴

- b) Zoobentos: são relativos aos animais que habitam a região bentônica. A Figura 51 apresenta alguns exemplos de zoobentos.

Figura 51 – Zoobentos¹⁵

¹⁴ Fitobentos. Disponível em: <<http://nilson01.files.wordpress.com/2010/06/fitobentos.jpg>>. Acesso em: 24 set. 2013.

¹⁵ Waterlife. Microfotografia de animais bentônicos típicos. Microfotografia feita por G. Carter, abr. 2000. Disponível em: <<http://www.glerl.noaa.gov/pubs/photogallery/Waterlife/pages/0686.html>>. Acesso em: 24 set. 2013.

Ao tamanho:

- a) Macrofauna: diversos metazoários (poliquetas, crustáceos, oligoquetas, moluscos, entre outros) $>0,5$ mm;
- b) Mesofauna: pequenos metazoários (nematódeos, crustáceos, oligoquetas, poliquetas, turbelários, moluscos, etc.) entre 0,5 mm e 0,062 mm;
- c) Microfauna: pequenos protozoários (flagelados e ciliados) e bactérias $<0,062$ mm.

A relação com o substrato:

- a) Epifauna/epiflora: são organismos que vivem sobre o substrato (Figura 52) (TAGLIAPIETRA; SIGOVINI, 2010).

Figura 52 – Bentos típico da epifauna

Fonte: Bentos (2013).

- b) Infauna: são os organismos que vivem entre os sedimentos, ocorrendo apenas em substratos inconsolidados (Figura 53).

Figura 53 – Bentos típico da infauna

Fonte: Bentos (2013).

A locomoção: os organismos bentônicos podem ser agrupados conforme seu mecanismo de locomoção e tipo de sedimento que habitam (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO - UFRJ, 2010):

- a) Sésseis (Figura 54): são os animais que vivem aderidos à superfície de substratos, por exemplo, algas e invertebrados.

Figura 54 – Organismo bentônico sésil

Fonte: Bentos (2013).

- b) Sedentários (Figura 55): possuem baixo poder de locomoção, vivem restritos a uma pequena área, por exemplo, poliplacófaros, gastrópodes, anelídeos, equinodermas, crustáceos.

Figura 55 – Organismo bentônico sedentário

Fonte: Bentos (2013).

- c) Vágeis (Figura 56): possuem locomoção eficiente, podem migrar longas distâncias, por exemplo, crustáceos, decápodes, cefalópodes, peixes.

Figura 56 – Organismo bentônico vágil

Fonte: Bentos (2013).

- d) Perfurantes (Figura 57): como os moluscos, crustáceos, poliquetas e esponjas.

Figura 57 – Organismo bentônico perfurante

Fonte: Bentos (2013).

Habitantes de sedimentos inconsolidados:

- a) Pivotantes (Figura 58): esponjas, actínias, alguns poliquetas.

Figura 58 – Organismo bentônico pivotante

Fonte: El Diario de las Mascotas (2013).

- b) Cavadores (Figura 59): se locomovem entre os sedimentos, construindo ou não galerias. Por exemplo, crustáceos, poliquetas, ouriços, estrelas, bivalves (UFRJ, 2010).

Figura 59 – Organismo bentônico cavador

Fonte: Bentos (2013).

- c) Intersticiais (Figura 60): nematodos, copépodos, ostracodas, isópodos, protozoários.

Figura 60 – Organismo bentônico intersticial

Fonte: Bentos (2013).

O bentos pode ainda ser classificado quanto à sua dieta ou estratégia de alimentação:

- a) Omnívoros: possuem dieta alimentar bastante variada, adaptam-se aos recursos que estão mais facilmente disponíveis;
- b) Depositívoros (Figura 61): ingerem sedimento ou selecionam matéria orgânica e micro-organismos presentes no sedimento, fazendo a seleção dos compostos nutritivos internamente.

Figura 61 – Organismo bentônico depositívoro

Fonte: Bentos (2013).

- c) Suspensívoros e Filtradores (Figura 62): alimentam-se de compostos orgânicos em suspensão na coluna d'água.

Figura 62 – Organismo bentônico filtrador

Fonte: Bentos (2013).

- d) Herbívoros, Carnívoros, Detritívoros: alimenta-se de compostos orgânicos em decomposição;
e) Necrófagos (Figura 63): são animais que se alimentam de organismos mortos.

Figura 63 – Organismo bentônico necrófago

Fonte: Bentos (2013).

Toda essa biodiversidade é afetada por diversas variáveis no ambiente. Bashir et al. (2012) citam algumas dessas variáveis que regulam a natureza e a abundância da vida no fundo do mar:

- a) Tipo de substrato (sedimentos rochosos ou friáveis);
- b) Velocidades das correntes próximas ao assoalho marinho;
- c) Concentração de oxigênio nas águas profundas;

- d) Fluxo vertical de matéria orgânica particulada que se dirige ao fundo do mar.

Tipo de substrato: controlam várias características do bentos profundo, incluindo a taxonomia (definição de grupos de organismos biológicos), padrões de mobilidade e tipos de alimentação. Substratos rígidos ou rochosos são frequentemente dominados por sésseis, esponjas, cnidários (águas-vivas, anêmonas) e foraminíferos (protozoários marinhos). Em sedimentos inconsolidados móveis, pobres em matéria orgânica, vermes como poliquetas que se alimentam de detritos são normalmente encontrados. Por outro lado, em sedimentos ricos em matéria orgânica, poliquetas que habitam seus próprios tubos são mais comuns.

Velocidades de correntes: influencia a natureza dos *habitats* bentônicos. Correntes próximas ao assoalho em áreas relativamente planas em mar profundo, bem como vastas regiões de colinas abissais, são geralmente lentas e incapazes de transportar a maioria dos sedimentos.

Concentração de oxigênio em águas profundas: o oxigênio serve como receptor de elétrons para o metabolismo oxidativo. Quando as concentrações de oxigênio da água caem para níveis abaixo de 0,5 mL/L no fundo do mar, esta baixa disponibilidade afeta diretamente a comunidade bentônica naquela região.

Fluxo vertical de matéria orgânica: a principal fonte de alimento para os habitantes de águas profundas, excluindo fontes hidrotermais e *cold seeps* (locais onde gases como sulfeto de hidrogênio e metano percolam através dos sedimentos e escapam para a coluna de água), é a “chuva” de partículas orgânicas, que variam de células de fitoplâncton individuais às carcaças de nécton, caindo da zona eufótica. A produtividade primária de matéria orgânica na zona eutrófica e a profundidade da coluna de água são dois fatores que afetam o fluxo de vertical que cai para o fundo do oceano.

Bashir et al. (2012) ainda se referem às regiões abissais, onde grandes criaturas habitam a superfície do assoalho marinho (megafauna epibêntica). Em abismos oligotróficos são geralmente encontrados animais que se alimentam do

sedimento, como xenofióforos (organismos unicelulares que podem ser vistos a olho nu) e alguns tipos de holotúrias (pepinos-do-mar), mas também algumas espécies de cnidários que se alimentam de material em suspensão também podem ser encontradas e são igualmente importantes. Habitantes de sedimentos em regiões abissais oligotróficas maiores que 2 mm (macrofauna) são raros. A massa média dos animais é muito pequena, em torno 0,07 mg, enquanto que o total de biomassa da macrofauna é de cerca de 0,02 - 0,12 mgm⁻². A biodiversidade nos locais bentônicos oligotróficos é alta, mas o número de espécies da macrofauna por unidade de área de fundo do mar é relativamente baixo.

Lalli e Parsons (1997) estabeleceram um valor médio da quantidade de biomassa de organismos bentônicos em diferentes profundidades. Um resumo do estudo é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores médios de biomassa de organismos bentônicos em diferentes profundidades

Faixa de Profundidade (m)	Biomassa Média (g m⁻²) (base úmida)
Faixa litorânea (baixa maré)	3 x 10 ³
<200	200
500 - 1.000	<40
1.000 - 1.500	<25
1.500 - 2.500	<20
2.500 - 4.000	<5
4.000 - 5.000	<2
5.000 - 7.000	<0,3
7.000 - 9.000	<0,03
>9.000	<0,01

Fonte: Lalli e Parsons (1997).

Segundo Flentje et al. (2012), pouco se sabe sobre a vida nas zonas bentônicas, abissal e hadal, em relação a regiões litorâneas, comparativamente. Isto é devido à sua relativa inacessibilidade. Assim como, para os organismos que habitam a região pelágica, os gradientes verticais de temperatura, luminosidade e salinidade são importantes para a definição de diferentes regimes de vida; para o bentos, a profundidade e a topografia são as variáveis mais importantes. Isto

significa que para cada um dos *habitats* bentônicos, existem diferentes condições de vida. Os animais que habitam diferentes zonas geralmente são de espécies diferentes, adaptadas ao meio ambiente particular no qual se encontram. Estes *habitats* bentônicos são dinamicamente ligados ao meio ambiente pelágico sobrejacente. A maioria dos organismos bentônicos está localizada no fundo do oceano, onde a luz do sol está ausente e, são inteiramente dependentes da matéria orgânica que é fotossinteticamente produzida na zona superior. As únicas exceções são algumas comunidades em que a cadeia alimentar começa com a produção quimiossintética das bactérias. Parte da matéria orgânica que sedimenta das águas superficiais é transportada e se torna fonte de alimentação para as comunidades bentônicas em profundidade. Partículas orgânicas e inorgânicas que afundam da superfície também ajudam a formar os sedimentos em que o bentos vive. Processos de decomposição geralmente ocorrem em águas profundas ou no fundo do mar, cujos nutrientes que são gerados são eventualmente devolvidos para a superfície e utilizados pelos fitoplâncton.

O ambiente de mar profundo se inicia a uma profundidade de 1.000 m e geralmente é considerado como estável e homogêneo. Não há luz do sol, as temperaturas da água são geralmente baixas (de -1 °C a 4 °C), salinidade e teor de oxigênio dissolvido constantes, e alta pressão hidrostática. Sedimentos de fundo inconsolidados provenientes do continente e/ou de organismos planctônicos mortos cobrem a maior parte do assoalho do mar profundo. Substratos consolidados são muito limitados em cristas meso-oceânicas e cumes submarinos. Se comparada com correntes marítimas superficiais, as correntes nas bacias do oceano profundo são lentas (geralmente <5 cm/s). Algumas áreas experimentam tempestades abissais, durante as quais as correntes aumentam suas velocidades e podem reverter sua direção (FLENTJE et al., 2012).

4.1.5.6 Estudos Ambientais: impactos ambientais

Pearson (1975) afirma que é necessário estabelecer condições de base para monitoramento ambiental em tempo real em operações mineiras no fundo do mar, prevendo redução e mitigação dos impactos ambientais através da formulação de

diretrizes adequadas e suas aplicações para garantir o desenvolvimento seguro do aproveitamento dos recursos marinhos.

Em geral, durante um processo de extração mineral no fundo do mar, haverá aspectos ambientais com diferentes níveis de criticidade que podem causar impactos (danos) ambientais. É muito importante, inicialmente considerar os impactos mais significativos, que podem ser listados como:

- a) Mudanças prejudiciais na diversidade de ecossistemas ou na manutenção das comunidades vivas naquele ambiente;
- b) Ameaça para a saúde humana através da exposição direta aos poluentes, ou através do consumo de organismos aquáticos expostos a possíveis materiais poluentes;
- c) Perda de valores estéticos, científicos, recreativos ou econômicos na região.

Berge, Markussen e Vigerust (1991) classificaram os principais impactos ambientais que uma mineração oceânica pode causar e estão apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Principais impactos ambientais em ambiente marinho

Impacto	Área Impactada	Duração*	Distância impactada	Recuperação**	Significância***
impacto físico no fundo do mar	fundo do mar	longo prazo	próxima	lenta	Alta
efeito de pluma acumulado	coluna d'água	longo prazo	próxima	lenta	Alta
re-sedimentação	fundo do mar	longo prazo	próxima e distante	lenta	Alta
impedimento nutricional	fundo do mar	longo prazo	próxima	lenta	baixa
propulsores	coluna d'água	curto prazo	próxima	rápida	baixa
expulsão de peixes e mamíferos marinhos	coluna d'água	curto prazo	próxima	rápida	baixa
redução da luminosidade	camada superficial	curto prazo	próxima	rápida	baixa
redução da qualidade luminosa	camada superficial	curto prazo	próxima	rápida	baixa
exaustão de gases	camada superficial/ ar	curto prazo	próxima	rápida	baixa
ruído	ar/ fundo do mar	curto prazo	próxima	rápida	baixa
interferência com a pesca comercial	coluna d'água	curto prazo	próxima	rápida	baixa
Colisão	superfície	curto prazo	próxima	rápida	muito baixa
perda da embarcação	fundo do mar	longo prazo	próxima	lenta	muito baixa
perda do sistema operacional submarino	fundo do mar	longo prazo	próxima	lenta	muito baixa

Fonte: Berge, Markussen e Vigerust (1991).

Nota:

***Duração:**

Curto prazo: perturbação da ordem de algumas semanas;

Longo prazo: perturbação da ordem de dois anos.

****Recuperação:**

Rápida: ambiente impactado vai se recuperar dentro de alguns meses;

Lenta: ambiente vai se recuperar ao estado normal em cerca de três anos.

*****Significância:**

Baixa: não causa qualquer perturbação grave ao meio ambiente;

Moderada: causador de efeito notável sobre o meio ambiente, mas sem afetar diretamente a comunidade em questão;

Alta: pode causar danos graves ao meio ambiente.

4.1.5.7 Estudos Ambientais: efeitos dos principais impactos ambientais

Embora haja uma forte pressão (e motivação) em explorar os vastos recursos energéticos no fundo do mar, são também requisitos legais e morais proteger o meio ambiente em torno das áreas operacionais (PARADA et al., 2012). Essa consciência ambiental está se traduzindo em convenções e regulamentações cada vez mais rígidas, mas também coerentes. Os estudos dos impactos ambientais relacionados à

atividade minerária submarina precisam ser muito mais amplos do que os exigidos em uma mineração a céu aberto, devido às características específicas do meio, bem como o escasso conhecimento que se possui no momento sobre o assunto. A seguir são apresentados os mais importantes impactos ambientais causados pela mineração oceânica.

a) Ruído

O ruído subaquático se propaga radialmente para longe de sua fonte, podendo chegar a 600 km de distância como no Projeto Solwara 1, da Nautilus Minerals, por exemplo.

As operações de equipamentos de mineração, tanto em superfície quanto no fundo do mar, podem gerar ruídos que afetam os habitantes marinhos (BASHIR et al., 2012).

Segundo Agarwal et al. (2012), o problema do ruído submarino tem sido negligenciado por muitos anos. Apenas após os anos 1990 que o impacto ambiental causado pelo homem em relação à geração de ruído subaquático está sendo levado a sério.

b) Embarcações de superfície

O ruído radial subaquático provocado pelas embarcações flutuantes tem efeito sobre as espécies marinhas. Geralmente, uma operação de mineração no assoalho marinho utiliza uma embarcação que permanece na mesma área, e faz barulho continuamente. A densidade de vida marinha é maior nas proximidades da superfície, e as criaturas nestas zonas são expostas ao ruído provocado pela embarcação (BASHIR et al., 2012).

c) Equipamentos em operação no assoalho marinho

Equipamentos operando nas profundezas do oceano também são fontes de ruído significativas. O som oriundo de uma fonte em águas submarinas profundas tende a ser transmitido para cima, porque as temperaturas no leito profundo do mar são geralmente mais baixas do que nas camadas superiores da água. Considerando a distância que o som pode se propagar, é evidente que o ruído de máquinas de mineração e equipamentos de processamento de minerais do fundo do mar pode afetar criaturas que vivem em todas as zonas do mar.

De acordo com Riccobene (2009), no fundo do mar há muitas criaturas que podem ser afetadas pelo ruído, pois normalmente, a condição nestes ambientes é bastante silenciosa. O ruído em um ambiente situado abaixo de 2.000 m de profundidade não é maior que 50 dB na faixa de frequência de 10 kHz a 45 kHz e de cerca de 60 dB na faixa de frequência de 2 kHz a 10 kHz.

David (2011) concluiu que quase todas as espécies marinhas experimentam o silêncio no fundo do mar. Portanto, o ruído induzido durante a atividade minerária do fundo do mar será mais alto que o ruído ambiente, e pode ter influência sobre as espécies marinhas. Além disso, as comunidades bentônicas que habitam tais profundidades possuem sistemas de detecção acusticamente sensíveis, o que lhes permitem detectar mudanças ambientais, falta de alimentos ou possíveis predadores.

d) Emissões de luz

Segundo Bashir et al. (2012), a interrupção de luz também deve ser abordada. O aumento do nível de luz pode afetar as comunidades bióticas que habitam estas profundidades, já que os ambientes abissais possuem pouca luminosidade. As criaturas que habitam estas regiões são adaptadas a estas condições, por exemplo, organismos que dependem de bioluminescência. Uma operação de mineração no assoalho marinho pode ter fontes de luz, sendo necessário haver controle desta variável. Durante a fase do projeto, estudos de iluminação são necessários, a fim de testar diferentes espectros de luz, e verificar quais espectros atraem o menor número de organismos.

e) Calor

Outro problema potencial levantado pelo trabalho de Bashir et al. (2012) é o aumento da temperatura causado durante a escavação, bombeamento e processos de beneficiamento. Todas estas operações são potenciais fontes de calor; o material dragado é transportado através de tubulação, onde ocorre atrito, fonte geradora de calor; lixiviação química, por exemplo, é um processo exotérmico; escavação mecânica também pode gerar mais calor. A descarga de rejeitos, após o processo de beneficiamento, provavelmente irá elevar a temperatura da água no local. É esperado que os rejeitos possuam temperaturas mais elevadas do que o ambiente próximo à descarga. No entanto, a temperatura média do oceano é de cerca de 2 °C,

o que significa que a interação entre o oceano frio e o rejeito levará a uma redução na temperatura dos rejeitos.

Steiner (2009) aborda esse tema como uma preocupação, já que os efeitos do aquecimento sobre as comunidades bentônicas ainda não são claramente conhecidos. Um possível atraso na descarga (devido ao mau funcionamento do equipamento, por exemplo) poderia provavelmente conduzir a uma maior temperatura dos rejeitos, podendo causar algum dano ambiental. Recomenda-se, portanto, uma opção de resfriamento do sistema durante o processamento, de modo que a quantidade de poluição térmica a partir do efluente na descarga ao fundo do mar seja minimizada.

f) Impactos na zona costal

Bonne (2010) alerta que as operações de extração mineral marinha podem afetar a linha da costa em diferentes modos: rebaixamento do nível da praia (erosão), mudança das correntes marinhas, mudança no transporte de sedimentos (ou alimentos), modificação das condições das ondas na região das praias e redução da área de proteção de linhas costeais adjacentes.

Em 2012 surgiu uma polêmica com relação a operações de dragagem de bancos de areia na Baía de San Francisco, California (EUA), nas proximidades das ilhas de Angel e Alcatraz e também por toda a Baía de Suisun. O Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey* - USGS) afirma que essas operações de dragagem estão retirando a proteção que mantém a Praia Ocean (*Ocean Beach*) livre de erosão. As conclusões foram obtidas através de modelos de correntes provocadas pelas marés e fluxo de sedimentos, indicando que parte da areia erodida que atravessa a *Golden Gate* é depositada nas praias. Segundo o USGS, as dragas de sucção operadas pelas mineradoras estão interceptando parte deste material antes que ele deixe a Baía, reduzindo os sedimentos recuperadores das praias e amortecedores de ondas. Porém, análises mais detalhadas precisam ser feitas, já que *Ocean Beach* sofre outras ações de erosão, mesmo não existindo operação de mineração na Baía, observação feita pelo próprio USGS. Outros fatores que agravam o problema é a operação de emissário submarino de esgoto e também de uma ação erosiva de um enorme banco de areia além da *Golden Gate*, que está alterando a dinâmica das ondas (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES PRODUTORAS DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL - ANEPAC, 2013).

g) Poluição das águas

De acordo com Agarwal et al. (2012), uma das principais preocupações com a mineração oceânica deve ser a poluição da água, já que a descarga de águas residuais dos processos é efetuada no local da lavra e deve seguir as regulamentações da Convenção Internacional para Prevenção da Poluição por Embarcações (*International Convention for the Prevention of Pollution from Ships-Marpol*).

h) Descarte de esgotos

A Convenção da Marpol contém uma série de requerimentos para controlar a poluição das águas marinhas por esgoto produzido nas embarcações.

É proibido que uma embarcação descarte esgoto no mar, a menos que esta embarcação tenha um plano de tratamento de esgoto aprovado, ou o esgoto seja desinfectado por um sistema previamente aprovado, a uma distância maior que 5,5 km (3 milhas náuticas) distantes da costa. Todo esgoto que não for desinfectado precisa ser disposto a uma distância, maior de 22 km (12 milhas náuticas) da costa. Entretanto, a poluição causada pelo descarte de esgoto no mar é menor que a causada pelo efeito pluma nos sedimentos e descarte de água de processos (AGARWAL et al., 2012).

i) Sedimentos em suspensão

Para Bashir et al. (2012), além do impacto inevitável sobre as comunidades bentônicas no sedimento a ser minerado, um dos efeitos mais comuns da mineração em alto-mar é a presença de sedimentos em suspensão na coluna de água e seus impactos associados. O impacto é maior no interior da região da lavra, mas sedimentos em suspensão podem ser carregados pelas correntes marinhas para fora da área de lavra, seja verticalmente ou horizontalmente (mais provável) através da coluna de água. Plumas de sedimentos estão associadas com o aumento da turbidez da água do mar e, eventualmente, podendo haver deposição dos sedimentos em um novo local.

Qualquer intervenção artificial no ecossistema no fundo do mar pode levar a alterações das características geoquímicas, bentônicas e litográficas locais. Sedimentos em suspensão podem obstruir o processo de filtração alimentar de organismos epibênticos e abafar algumas criaturas sésseis. Em geral, isso acontece

quando a taxa de deposição é maior do que a capacidade de que algumas espécies mais lentas têm de se movimentar e escapar. Espécies que dependem de bioluminescência estariam vulneráveis à mudanças na turbidez da água. Assim, Markussen (1994) adverte que fauna que se alimenta de sedimentos seria ameaçada pela escassez de alimentos se estes conseguirem sobreviver ao impacto direto da mineração.

Thiel (2003) também alerta para o fato de que, em alguns casos, o material ressedimentado (rejeitos, por exemplo) também pode ser colonizado por espécies oportunistas, resultando uma composição bentônica diferente da comumente encontrada nas regiões abissais. Os impactos sobre a comunidade macro e meso bentônica abissal são muito intensos porque o equilíbrio do meio ambiente em grandes profundidades é muito susceptível a variações; pequenas alterações podem ter grandes implicações (BASHIR et al., 2012).

j) Poluição do ar

De acordo com Agarwal et al. (2012), o Anexo VI da Convenção Marpol fornece orientações sobre prevenção da poluição do ar por navios. Em 2011, a Organização Marítima Internacional (*International Maritime Organization – IMO*) adotou disposições técnicas para aumentar a eficiência energética e reduzir a emissão de gases dos navios. Estas disposições passaram a ser aplicadas em 1º de janeiro de 2013.

Emissões atmosféricas provenientes das extrações de nódulos metálicos são esperadas e deverão conter dióxido de enxofre, monóxido de carbono, dióxido de carbono e óxido de nitrogênio. Grande parte desses gases poluentes será proveniente da queima de combustível das embarcações e demais equipamentos. A Convenção limita a quantidade de emissões e proíbea emissão deliberada de substâncias destruidoras da camada de ozônio pelos navios. Ela também fornece normas rígidas para o dióxido de enxofre, óxido de nitrogênio e material particulado nas áreas de operação. Mesmo havendo emissões para a atmosfera, é esperado que a poluição seja reduzida, pois se espera que as empresas se adequem às normas e regulamentos estabelecidos pela Convenção.

4.1.5.8 Estudos Ambientais: mitigação

Para minimizar os impactos descritos anteriormente, Bashir et al. (2012) sugerem cuidados adicionais que devem ser tomados com relação ao método, a quantidade e a taxa de deposição dos sedimentos para a coluna de água. A descarga dos resíduos (ou rejeitos) deve ser realizada o mais próximo possível do fundo do mar, de uma forma que cause a menor perturbação hidrodinâmica possível de outros sedimentos; uma técnica adequada seria a descarga dos rejeitos de volta à depressão (*pit*) formada pela lavra. Desta forma, a topografia local original seria parcialmente, ou totalmente recomposta, dependendo da situação. Se o processo de ressedimentação for combinado com correntes marítimas ricas em nutrientes, o reassentamento de partículas argilosas seria acompanhado por uma grande quantidade de matéria orgânica rica, que por sua vez pode trazer efeitos positivos sobre a bentônica local e de comunidades adjacentes.

Torna-se, pois, necessário que sejam realizados estudos ambientais robustos e completos, incluindo modelos preditivos e simulações computacionais que levem em conta os vários fatores marítimos locais e suas interações com a atividade minerária.

4.1.5.9 Estudos Ambientais: deposição de rejeitos em mar profundo

Disposição de rejeitos é uma das maiores preocupações na indústria mineral em terras continentais, e será também motivo de preocupação em atividades minerárias no fundo do mar. Rejeitos da mineração geralmente vêm em forma de polpa. Estas polpas são formadas por materiais em suspensão que abrangem, além da água, minerais de ganga, quantidades residuais do mineral-minério e algum reagente químico utilizado no processamento. As composições variam de acordo com a indústria e localização. Há uma série de métodos propostos para a sua eliminação segura. Entre estas, pode-se citar duas soluções interessantes de disposição de rejeitos:

a) Disposição submarina (*Submarine Tailings Disposal* - STD)

Frequentemente ocorre em profundidades relativamente rasas. Extensas áreas podem ser afetadas, pois nessas regiões o fundo do mar pode ser recoberto pelo rejeito. Neste caso, é essencial manter o controle sobre a densidade e temperatura do material a ser depositado, evitando que ele viaje por longas distâncias, ou mesmo flutue à superfície.

b) Deposição em alto mar (*Deep Sea Tailings Placement* - DSTP)

Este método utiliza dutos para transportar e descarregar o material bem longe da costa, em grandes profundidades.

Van Zyl et al. (2002b) recomendam que, ao se utilizar este método, os rejeitos sejam despejados sempre em grandes profundidades para minimizar o risco de os rejeitos subirem (flutuarem) para a superfície da coluna de água, onde ocorre a maioria das zonas biologicamente ativas. Diferenças na densidade da coluna de água no mar causam estratificação, que é eficaz na retenção dos rejeitos sólidos de rejeito em profundidade. Van Zyl et al. (2002a) recomendam profundezas maiores do que 1.000 m para deposição de rejeitos.

Para Bashir et al. (2012), outra medida para evitar o arraste de sedimentos à superfície da água é através da remoção de possíveis bolha de ar da massa da polpa. Outro tratamento que pode ser utilizado antes da descarga é a remoção de produtos químicos, neutralizando a polpa até a um ponto em que não cause prejuízo maior ao meio ambiente.

É essencial que a tubulação tenha robustez suficiente para se manter íntegra e com menos possibilidade de ruptura ou vazamentos, quando do início da operação. Monitoramentos e manutenções regulares são práticas essenciais para assegurar uma operação segura. Recomenda-se ainda revestir a tubulação com invólucro de aço para que esta resista às condições submarinas adversas.

4.1.5.10 Estudos Ambientais: regulamentação global de descarte

O descarte de resíduos no oceano, em nível global, é regulamentado pela "Convenção da Prevenção de Poluição Marinha por Descarte de Resíduos e Outros Materiais", também conhecida como "Convenção de Londres".

O Protocolo da Convenção de Londres, Anexo I, Artigo 4º é o seguinte:

proíbe-se todo o descarte, exceto:

- 1) material dragado;
- 2) lodo de esgoto;
- 3) resíduos de peixe;
- 4) embarcações e estruturas feitas pelo homem no mar;
- 5) material geológico inerte;
- 6) material orgânico de origem natural;
- 7) certas estruturas não perigosas feitas de ferro, aço, concreto e materiais inofensivos semelhantes, para os quais a preocupação é o impacto físico, e limitada a circunstâncias em que tais resíduos sejam gerados em locais, tais como pequenas ilhas com comunidades isoladas, sem acesso possível às opções de disposição, que não seja o descarte (CONVENÇÃO..., 1978).

4.1.6 Aspectos legais da mineração oceânica

Segundo Fernandes (2012), desde 1930, a “Liga das Nações” tentava criar um mecanismo jurídico relativo ao mar, que fosse aceito internacionalmente. Em 1958 e em 1960, agora como Organização das Nações Unidas (ONU), ocorreram as duas primeiras conferências sobre o Direito do Mar. Ambas as reuniões foram infrutíferas. Em 1967, abria-se novamente o debate, na Assembleia Geral. Iniciou-se um período de negociações preparatórias que se estendeu por cinco anos no Comitê para os Fundos Marinhos. Finalmente, em 1973, começava a III Conferência das Nações Unidas sobre o Direito do Mar. Ao longo de nove anos, foram realizadas 11 sessões dessa Conferência, até que, em 1982, chegou-se ao seu encerramento, em Montego Bay (Jamaica) com a aprovação da Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (CNUDM). Cerca de 170 países participaram dos debates, incluindo países que não eram membros da ONU.

O Brasil foi um dos signatários da Convenção de 1982, ratificando-a em 1988. Para se adequar à nova legislação, foram instituídos os limites marítimos do Brasil pela Lei nº 8.617 de 4 de janeiro de 1993. Desta forma, o mar territorial brasileiro que era de 200 milhas náuticas (370,4 km), instituído pelo Decreto-Lei nº 1.098 de 25 de março de 1970, passou a ser de 12 milhas náuticas (22,2 km), a partir da linha de base (CAVALCANTI, 2011). A Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (CNUDM) passou a vigorar em nível internacional em 16 de novembro de 1994 (FERNANDES, 2012).

Para avançar no assunto, torna-se necessário agora, expor alguns conceitos definidos pela CNUDM.

Mar territorial: extensão do território de uma nação costeira, onde o Estado exerce a soberania e controle pleno CNUDM (artigos 2 e 3, de 1982) (SOUZA, 1999). Essa zona do mar adjacente é medida a partir das linhas de base (retas ou normais) e não podem ultrapassar 12 milhas náuticas (22,2 km). Tal soberania estende-se à massa líquida, ao espaço aéreo sobrejacente e também a seu solo e subsolo, com direitos exclusivos sobre seus recursos vivos e não vivos (CAVALCANTI, 2011; FERNANDES, 2012; SOUZA, 1999).

No exercício de sua soberania, os Estados costeiros têm o direito exclusivo de regulamentar, autorizar e realizar investigação científica marinha em seu mar territorial. O conceito de mar territorial é amplamente aceito pela comunidade internacional, mesmo pelos Estados que não ratificaram a Convenção, entre eles os Estados Unidos (FERNANDES, 2012).

“Passagem Inocente”: é um direito que os navios de qualquer Estado (costeiro ou sem litoral) têm, de passar pelo mar territorial de qualquer outro Estado, desde que não prejudique a paz, a boa ordem ou a segurança do Estado costeiro. O direito da “passagem inocente” deixa de existir quando realizadas por navios em quaisquer das atividades previstas no Artigo 19 da CNUDM, entre elas o uso da força contra a soberania e a integridade territorial do Estado costeiro, bem como exercícios ou manobras com armas de qualquer tipo. Ao exercerem aquele direito, navios estrangeiros dotados de propulsão nuclear e os que transportem substâncias radioativas devem observar as medidas especiais de precaução e ter a bordo os documentos estabelecidos nos acordos internacionais (FERNANDES, 2012).

O Estado costeiro não exerce soberania a partir do limite exterior do mar territorial, mas somente “direitos de soberania na zona econômica exclusiva e na plataforma continental”.

Zona Contígua: o Estado costeiro pode estabelecer, de acordo com a CNUDM, uma zona além do mar territorial, como medida de proteção ao seu território, não podendo se estender para além de 24 milhas náuticas (44,4 km) a partir das linhas de base. O Estado costeiro não possui soberania nessa região,

devendo fiscalizar e reprimir infrações às normas sanitárias, fiscais, de imigração e quaisquer outras vigentes em seu território. Portanto, a zona contígua se sobrepõe à Zona Econômica Exclusiva (CAVALCANTI, 2011; FERNANDES, 2012).

Zona Econômica Exclusiva (ZEE): conforme citado na seção 4.1.1, a ZEE está situada além do mar territorial, adjacente a este CNUDM (artigo 55) (SOUZA, 1999), não podendo exceder 200 milhas náuticas (370,4 km) das linhas de base, a partir das quais se mede a largura do mar territorial CNUDM (artigo 57) (SOUZA, 1999). Segundo Cavalcanti (2011), na ZEE, o estado costeiro possui direitos de exploração e aproveitamento, conservação e gestão dos recursos naturais, vivos ou não vivos das águas sobrejacentes ao leito do mar, do leito do mar e seu subsolo CNUDM (artigo 56, parágrafo 1, alínea a) (SOUZA, 1999). A ZEE pode se estender para além das 200 milhas náuticas das linhas de base a partir das quais se mede a largura do mar territorial. Portanto, a ZEE brasileira está situada entre 12 e 200 milhas náuticas, com 188 milhas náuticas (348,1 km) de extensão (FERNANDES, 2012).

O Estado costeiro possui ainda, na ZEE, direito de realizar outras atividades de exploração e aproveitamento econômico, como no caso de produção de energia a partir da água, das correntes marítimas e dos ventos. Possui ainda jurisdição para criar ilhas artificiais, instalar estruturas destinadas à investigação marinha CNUDM (artigo 60, parágrafo 1) (SOUZA, 1999), a proteção e preservação do meio marinho (CAVALCANTI, 2011; FERNANDES, 2012). A atividade de exploração científica na ZEE brasileira poderá ser realizada por instituições nacionais e/ou internacionais após a obtenção do consentimento do governo brasileiro. Na ZEE, a navegação, o sobrevoo, a instalação de cabos e dutos submarinos, assim como outros usos internacionais lícitos são inteiramente livres para todas as outras nações (CAVALCANTI, 2011; FERNANDES, 2012).

De acordo com Fernandes (2012), o Estado costeiro poderá fazer a captura permissível de recursos vivos em sua ZEE, evitando o excesso e otimizando seu uso. Quando o Estado costeiro não tiver condições de realizar tais capturas permissíveis, deverá dar a outro Estado acesso ao excedente, mediante acordos ou outros ajustes previstos na Convenção CNUDM (artigo 62, parágrafo 2) (SOUZA,

1999). Estados sem litoral e costeiros geograficamente desfavorecidos têm direito a participar, em base equitativa, do aproveitamento de uma parte do excedente.

No Brasil, obedecendo aos critérios estabelecidos pela Convenção, a delimitação de sua ZEE estende-se por toda a costa, englobando também as áreas situadas em torno de Fernando de Noronha, Trindade e Martim Vaz, Atol das Rocas, Arquipélago de São Pedro e São Paulo, totalizando 3,5 milhões de km² (Figura 64).

Figura 64 – Zona Econômica Exclusiva brasileira (linha amarela)

Fonte: Brasil (2008).

Linhas de Base: são utilizadas como origem do mar territorial, da zona contígua, da zona econômica exclusiva e, em alguns casos, da própria plataforma continental jurídica (Figura 65). As linhas de base podem ser normais ou retas. Quando normais, elas acompanham a linha de baixa-mar, conforme indicada nas cartas náuticas produzidas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) do Ministério da Marinha. Nos locais onde a linha de costa apresenta recortes profundos ou uma franja de ilhas na sua proximidade imediata, é permitido o uso das

linhas de base retas, mediante a união de pontos apropriados, que, no caso do litoral brasileiro, constam do Decreto nº 1.290, de 21 de outubro de 1994 (CAVALCANTI, 2011; SOUZA, 1999).

Figura 65 – Representação das linhas de base

Fonte: Fernandes (2012).

Plataforma Continental: “A plataforma continental de um estado costeiro compreende o leito e o subsolo das áreas submarinas que se estendem além do seu mar territorial, em toda a extensão do prolongamento natural do seu território terrestre, até ao bordo exterior da margem continental, ou até uma distância de 200 milhas náuticas (370,4 km) das linhas de base a partir das quais se mede a largura do mar territorial, nos casos em que o bordo exterior da margem continental não atinja essa distância”. Esta é a definição citada por Cavalcanti (2011) sobre o artigo 76, parágrafo primeiro da CNUDM. Esta definição tem uma conotação mais jurídica e menos fisiográfica ou geomorfológica (Heezen, Tharp e Ewing, 1959 apud SOUZA, 1999). Pela definição jurídica da Plataforma Continental (PC), nos casos em que o bordo exterior da margem continental não se estender até 200 milhas náuticas (370,4 km), surge o conceito da Plataforma Continental Jurídica (PCJ), que pode englobar as feições fisiográficas conhecidas como plataforma, talude e elevação continentais, podendo chegar inclusive às regiões da planície abissal. Nestes casos, a PCJ acaba por se confundir com o conceito da ZEE, que por ser mais abrangente será utilizado para definir esta porção do espaço marinho. A Figura 66 apresenta as regiões no mar e seus limites.

Figura 66 – Regiões do mar e seus limites

Fonte: Carvalho (2013).

Segundo Souza (1999), a determinação do limite exterior da PCJ de um Estado costeiro é obtida pela utilização integrada dos critérios de delimitação da Margem Continental Jurídica (MCJ) – conceito implicitamente embutido no parágrafo 4º do artigo 76 da CNUDM – com os critérios de restrição da máxima extensão da PCJ (CNUDM, art. 76, par. 5).

Nos termos do parágrafo 4º do artigo 76, o Estado costeiro deve estabelecer o bordo exterior da MCJ, quando esta se estender além das 200 milhas náuticas (370,4 km), por intermédio de (Figura 67):

- a) Uma linha unindo pontos nos quais "[...] a espessura das rochas sedimentares seja pelo menos 1% da distância mais curta entre esse ponto e o pé do talude continental" ou
- b) uma linha unindo "[...] pontos fixos situados a não mais de 60 milhas marítimas (111,1 km) do pé do talude continental."

Figura 67 – Critérios para delimitação da Plataforma continental Jurídica

a) Critério da Espessura Sedimentar

b) Critério da Distância Fixa de 60 m.m.

c) EXTENSÃO MÁXIMA DA PLATAFORMA CONTINENTAL:
350 milhas marítimas (648 km) ou 100 milhas marítimas
(185 km) a partir da isóbata de 2500 metros.

Fonte: Souza (1999).

Nota-se que o pé do talude continental é a feição de referência dos dois critérios de determinação da MCJ. Ainda de acordo com o parágrafo 4º, esta feição é definida como: "Salvo prova em contrário, o pé do talude continental deve ser determinado como o ponto de variação máxima do gradiente na sua base" (SOUZA, 1999, p. 81).

Uma vez determinado o bordo exterior da MCJ por qualquer dos critérios descritos acima, o parágrafo 5º do artigo 76 estabelece que os pontos fixos que constituem a linha dos limites exteriores da plataforma continental no leito do mar devem estar situados a uma distância que não exceda 350 milhas náuticas (648,2 km) da linha de base a partir da qual se mede a largura do mar territorial ou a uma distância que não exceda 100 milhas náuticas (185,2 km) da isóbata de 2.500 metros (linha que une profundidades de 2.500 metros) (CAVALCANTI, 2011; SOUZA, 1999).

Portanto, a PCJ pode atingir distâncias maiores que 350 milhas náuticas (648,2 km), desde que obedeça aos critérios estabelecidos pela CNUDM.

No Brasil, o Decreto nº 98.145 de 15 de setembro de 1989 instituiu o Plano de Levantamento da Plataforma Continental Brasileira (Leplac), objetivando estabelecer o limite exterior da PC brasileira com enfoque jurídico, ou seja, determinar a área marítima para além das 200 milhas náuticas (370,4 km) para que o país possa usufruir da soberania para a exploração e o aproveitamento de recursos naturais no leito e subsolo marinho, previsto pela CNUDM (CAVALCANTI, 2011).

No ano de 2004, foi encaminhada à Comissão de Limites da Plataforma Continental (CLPC) da ONU a proposta de Limite Exterior da Plataforma Continental Brasileira. A área total que o Brasil reivindicou para além das 200 milhas náuticas (370,4 km) é de 960.000 km², distribuída ao longo da costa brasileira, conforme Figura 68 que é também conhecida como “Amazônia Azul”.

Com a aprovação da proposta, a área total pertencente ao Brasil seria de 12,95 milhões de km², levando em conta o território (8,5 milhões de km²), ZEE (3,5 milhões de km²) e a extensão da plataforma continental (0,95 milhões de km²).

Figura 68 – “Amazônia Azul” e áreas legais correspondentes

Fonte: Carvalho (2004).

4.1.6.1 A questão da Amazônia Azul

A expressão “Amazônia Azul” foi criada no ano de 2004, pelo então Comandante da Marinha, Almirante de Esquadra Roberto Guimarães Carvalho.

Carvalho (2004) inicia sua obra com a frase “toda riqueza acaba por se tornar objeto de cobiça, impondo ao detentor o ônus da proteção”. Pensando desta forma, quando se trata de recursos naturais, o tema atinge conotações de soberania nacional, que exigem políticas adequadas, não se limitando apenas à defesa daqueles recursos, mas incluindo-as, obrigatoriamente.

A Amazônia brasileira, possui mais de 4 milhões de quilômetros quadrados, abrigando grande parcela da água doce do planeta, reservas minerais e uma das maiores biodiversidades do planeta. Desta forma, a região passou a ser objeto de grandes iniciativas governamentais, que visavam à consolidação de sua integração ao território nacional, à garantia das fronteiras, à ocupação racional do espaço físico e à exploração sustentável de recursos naturais.

Carvalho (2004) faz uma analogia, afirmando a existência de uma outra Amazônia. Essa “nova” Amazônia ainda é despercebida pela maioria dos brasileiros, como a Amazônia verde foi, por séculos. Trata-se da Amazônia Azul, que, maior do que a verde, é extremamente rica. Portanto, cabe à Nação, protegê-la.

Cavalcanti (2011) cita que, em abril de 2007 a CLPC não atendeu em sua totalidade ao pleito brasileiro. A CLPC não concordou com cerca de 190.000 km, representados pelo Cone do Amazonas, Cadeias Norte Brasileiras e Vitória Trindade e Margem Continental Sul. Como resultado, o Brasil não aceitou o veredito e está em fase de preparação de nova proposta.

A Figura 69 ilustra a proposta inicial brasileira. A cor azul escura indica a área da plataforma continental além da ZEE pleiteada pelo Brasil e que foi acolhida pela CLPC, enquanto a área em cor vermelha é aquela não acolhida pela CLPC. A cor azul claro indica a região até 200 milhas náuticas (370,4 km) da ZEE, conforme os termos da CNUDM.

Figura 69 – Regiões legais na costa brasileira

Fonte: Fernandes (2012).

4.1.6.2 O alto mar

Segundo Cavalcanti (2011), o alto mar compreende todas as partes do mar não incluídas na zona econômica exclusiva, no mar territorial ou nas águas interiores de um Estado, nem incluídas nas águas arquipelágicas de um Estado arquipélago, estado aberto a todos os Estados (costeiros ou sem litoral). No alto mar, todos os Estados têm liberdade de navegação, de sobrevoo, de instalar cabos e dutos, de construir ilhas artificiais e outras instalações, de pesca e de realizar investigações científicas, conforme previsto nos termos da CNUDM. Dispõe ainda, que o alto mar deverá ser utilizado para fins pacíficos e que nenhum Estado pode legitimamente pretender submeter qualquer parte do alto mar à sua soberania.

4.1.6.3 Área Internacional dos Fundos Marinhos (Área)

De acordo com Cavalcanti (2011), antes da assinatura da Convenção das Nações Unidas sobre Direito do Mar (CNUDM), em 1982, não havia uma regulação aplicável às águas internacionais. Este fato provocou inúmeras discussões nos foros políticos internacionais. Com a assinatura da Convenção, as bases legais para exploração dos recursos minerais da Área estão previstas na CNUDM, que estabelece que a Área e seus recursos sejam patrimônio comum da humanidade. Os recursos da Área são definidos como todos os minerais sólidos, líquidos ou gasosos superficiais ou subsuperficiais.

A Área é regulamentada pelas normas estabelecidas na parte XI da CNUDM, em que se encontram todas as informações pertinentes, desde o regime de aproveitamento econômico dos seus recursos, às políticas de exploração, além da definição do órgão internacional incumbido pela supervisão e gestão destas atividades, definido como Autoridade Internacional dos Fundos Marinhos (Autoridade).

4.1.6.4 Autoridade Internacional dos Fundos Marinhos (Autoridade)

A Autoridade (*International Seabed Authority* – ISA) foi criada para ser uma organização internacional autônoma de caráter supranacional, encarregada de administrar a Área, atuando em nome e no interesse da humanidade. A Autoridade, sediada na cidade de Kingston (Jamaica) foi criada em 1994, quando a Convenção passou a vigorar, e entrou em funcionamento em 1996. É composta por uma Assembleia, órgão supremo encarregado de elaborar a política geral sobre os assuntos de competência da Autoridade; um Conselho, órgão executivo composto por uma Comissão de Planejamento Econômico e uma Comissão Jurídica e Técnica; um Secretariado, a quem compete os trabalhos de assessoria nas funções administrativas da Autoridade e pela Empresa, órgão destinado a realizar as atividades de pesquisas diretas na Área em seu nome.

A exploração e o aproveitamento dos recursos da Área podem ser realizados pela Autoridade sob duas formas:

- a) Execução direta, por intermédio da Empresa, que pode atuar isoladamente ou em parceria com os estados membros (*joint ventures*) ou
- b) através do regime de concessões, em que os estados participantes ou suas empresas, públicas ou privadas, exercem as atividades em associação e sob a supervisão da Autoridade.

As regulamentações feitas pela Autoridade referentes à prospecção, exploração e aproveitamento dos recursos minerais referem-se somente a nódulos polimetálicos. Os regulamentos para a exploração e o aproveitamento de outros recursos minerais encontrados na Área, como sulfetos polimetálicos e crostas cobaltíferas, ainda estão em fase de elaboração e deverão ser os próximos a serem oficializados (CAVALCANTI, 2011).

4.1.6.5 Tribunal Internacional dos Direitos do Mar (International Tribunal for the Law of the Sea - ITLOS)

De acordo com Egorov et al. (2012), o Tribunal Internacional dos Direitos do Mar (ITLOS) é uma organização independente, criada pela Organização das Nações Unidas (ONU) com o objetivo de resolver questões legais que possam surgir da aplicação da Convenção. O ITLOS fica localizado em Hamburgo (Alemanha) e consiste de 21 membros independentes com grande conhecimento nas questões das Leis do Mar. O Tribunal tem jurisdição sobre todas as questões relativas à interpretação e aplicação de limites e obrigações. Disputas podem ser submetidas pelos Estados que ratificaram a Convenção, bem como por organizações intergovernamentais.

4.1.6.6 Organização Marítima Internacional (IMO)

A Organização Marítima Internacional (*International Maritime Organization - IMO*) foi fundada pela ONU em Genebra (Suíça) em 1948, sendo sediada em Londres (Reino Unido). Ela atua com um sistema regulatório sobre as questões de navegação, a sua segurança, aspectos ambientais, legais, cooperação técnica e eficiência no transporte. Este sistema regulatório é implementado através de várias

convenções, como a Convenção Internacional para a Segurança da Vida no Mar (*International Convention for the Safety of Life at Sea- SOLAS*) que foi adotado pela primeira vez em 1914, após o desastre do Titanic; desde então, a IMO tem modificado e atualizado estas convenções. Concomitantemente, a IMO atua na Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição do Mar por Óleo (*International Convention for the Prevention of Pollution of the Sea by Oil - Oilpol*). Além disso, o trabalho de regulamentação da IMO abrange uma ampla gama de questões marítimas, como a segurança da navegação, busca e salvamento, remoção de destroços, arqueação, responsabilidade e compensação, reciclagem de navios, treinamento e certificação de marinheiros, medição de emissões e pirataria. Esta última está relacionada com os mais recentes desenvolvimentos na segurança marítima Código de Segurança de Instalações Portuárias e Navios Internacionais (EGOROV et al., 2012).

4.1.6.7 Legislação mineral brasileira

A atual legislação brasileira que regulamenta a pesquisa e lavra mineral não faz distinção entre áreas submarinas e terrestres. O Código de Mineração, Decreto-Lei nº 227/1967, modificado pela Lei nº 9.314/96, regulamenta os direitos sobre os recursos minerais do país, seu regime de aproveitamento, e a fiscalização da pesquisa, da lavra e de outros aspectos da indústria mineral, que deve ser feita pelo Governo Federal (CAVALCANTI, 2011).

Assim como funciona no continente, o aproveitamento de substâncias minerais no mar territorial, na plataforma continental e na zona econômica exclusiva, depende de alvará de autorização de pesquisa, do Diretor-Geral do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) e de concessão de lavra, outorgada pelo Ministro de Estado de Minas e Energia, conforme Artigo 2º do Código de Mineração (BRASIL, 1967).

Segundo Martins (2009a), em 8 de dezembro de 2008 foi publicado o Decreto nº 6.678, que aprova o VII Plano Setorial para os Recursos do Mar (PSRM), o qual se concentra no uso sustentável dos recursos vivos, não vivos e no monitoramento oceanográfico e climatológico, “ampliando o horizonte de atuação do governo para espaços marítimos além dos limites da jurisdição nacional”. Dessa forma, o VII

PSRM abrange a Zona Costeira, a Zona Econômica Exclusiva e Plataforma Continental Brasileira, “incluindo o seu leito e seu subsolo, bem como as demais áreas marítimas de interesse brasileiro”.

O Decreto ainda estabelece que os princípios gerais para o gerenciamento sustentável da exploração de recursos minerais marítimos devem incluir:

- a) A conservação de bens minerais assegurando a existência de reservas estratégicas;
- b) O encorajamento do uso eficiente dos bens minerais;
- c) O incentivo ao uso de métodos extrativos que minimizem impactos adversos ao ambiente;
- d) O estudo da quantidade total de minério a ser extraído e do ritmo de exploração, com o objetivo de controlar o impacto potencial da operação;
- e) O gerenciamento das atividades de extração visando à sustentabilidade do ecossistema;
- f) A existência de áreas com maior grau de sensibilidade e de áreas legalmente protegidas, como as áreas de conservação marinhas, de pesca e de interesse para outros usos legítimos do mar.

Em face das potencialidades dos fundos oceânicos, o Decreto determina observação aos seguintes pontos básicos na formulação de políticas e estratégias para a pesquisa e aproveitamento dos recursos não vivos do mar:

- a) A eventual corrida internacional para requisição de locais de exploração mineral na denominada Área;
- b) O desenvolvimento de tecnologia marinha para exploração e exploração em águas profundas;
- c) A erosão costeira;
- d) A exaustão das reservas continentais;
- e) A crescente dependência nacional de fertilizantes importados;
- f) O aproveitamento das estruturas operacionais da exploração de determinados bens minerais.

4.1.7 Exemplos atuais de mineração oceânica

O maior desafio para o desenvolvimento tecnológico em mineração oceânica é a integração dos subsistemas para torná-los operacionais por aproximadamente 300 dias por ano, sob condições ambientais extremas, tais como temperaturas de 1 - 2 °C, pressão de 50 Mpa, escuridão extrema, correntes marinhas em diferentes níveis na coluna d'água, topografia irregular, variabilidade das características no fundo do mar e heterogeneidade dos depósitos (SHARMA, 2011).

Mesmo diante destas adversidades, alguns países saíram na frente na corrida pelos minerais depositados no fundo do mar. Canadá, Alemanha e Japão, por exemplo, já consideram a mineração oceânica uma realidade. O Brasil, por sua vocação mineradora, também dá sinais de evoluir rapidamente com relação aos aspectos tecnológicos da mineração oceânica. A seguir são apresentados casos reais e importantes do atual cenário da mineração oceânica.

4.1.7.1 Projeto Solwara 1

O esperado rompimento da “nova fronteira da mineração” está finalmente se tornando realidade graças ao ambicioso Projeto Solwara 1, da empresa canadense Nautilus Minerals. O projeto prevê extração submarina de recursos do fundo do mar na costa da Papua Nova Guiné, apesar das objeções veementes de ambientalistas e ativistas locais.

Segundo reportagem de Oliver Milman, publicada *online* em 6 de agosto de 2012, o governo de Papua Nova Guiné concedeu licença de 20 anos à Nautilus Minerals, sendo esta a primeira operação de mineração comercial do mundo em mar profundo (MILMAN, 2012).

Nautilus Minerals irá minerar uma área a 1,6 km abaixo do Mar de Bismarck, a 50 quilômetros da costa da ilha de Nova Bretanha. O minério a ser extraído contém cobre de alto teor e ouro. A Figura 70 apresenta uma operação de coleta de amostras rochosas em águas profundas.

Figura 70 – Coleta de amostra mineral em águas profundas

Fonte: Nautilus Minerals (2013).

A organização denominada *Deep Sea Mining* (DSM), opositora à operação; estima que 1 milhão de quilômetros quadrados do fundo do mar na região do Oceano Pacífico (Ásia) está sob licença de exploração. Sozinha, a Nautilus tem cerca de 524.000 km² sob licença, ou pendente de licença, em Papua Nova Guiné, Tonga, Nova Zelândia e Fiji. A grande reivindicação da organização é que a empresa informe aos moradores quais os riscos que a operação minerária trará para a região.

O processo de mineração irá aproveitar “chaminés” hidrotermais submarinas que expõem grandes quantidades de minerais (Figura 71). O minério será então enviado por tubulações a um reservatório intermediário, onde será efetuada a separação entre o minério e a água, que retornará ao fundo do mar.

Figura 71 – “Chaminés” expelindo metais em águas marinhas profundas
(*hydrothermal vents* ou *black smokers*)¹⁶

As preocupações da DSM passam pelo possível extermínio de organismos habitantes em águas profundas ainda a serem descobertos pela ciência, bem como se o efeito pluma dos sedimentos poderia expor a vida marinha a metais tóxicos prejudicando a cadeia alimentar de atum, golfinhos e até seres humanos.

Em sua defesa, pode-se afirmar que o projeto estará extraíndo minério de alto teor, ou seja, menos material deverá ser retirado para obtenção da mesma quantidade de produto final. Além disso, nas profundidades em que o projeto estará operando (1.600 m) não existem peixes. A maioria dos peixes habitam profundidades menores que 1.000 metros. A Nautilus Minerals afirma que realizou um rigoroso estudo ambiental na região. A mesma empresa afirma ainda que, ao contrário de uma mina terrestre, não há necessidade de construção de estradas e outras obras de infraestrutura, além de não contar com deslocamentos de grande quantidade de pessoas.

Segundo a empresa, durante a operação de extração dos minerais pelas chaminés, que será feito através de corte, outra chaminé cresce; o que equivaleria a um “corte de grama”. A área de lavra também será menor, se comparada a minas a céu aberto.

¹⁶ Hydrothermal vents or black smokers. Disponível em: <<http://www.angelfire.com/planet/es767spring2006>>. Acesso em: 24 set. 2013.

A Nautilus Minerals estima que nos primeiros 30 meses de operação a mineração vai levar cerca de USD\$142M em benefícios para a economia de Papua Nova Guiné, esperando empregar 70% da equipe do projeto no próprio país, em três anos.

Em 17 de outubro de 2013, Cecilia Jamasmie publicou também *online* que a Nautilus Minerals prevê uma segunda operação nos depósitos de sulfetos polimetálicos massivos do Mar de Bismark em 2017, já que o preço dos metais, principalmente cobre, está atrativo e há uma projeção de aumento significativo de demanda deste metal especificamente (JAMASMIE, 2013).

Como conclusão a todas as notícias e controvérsias que o tema abriga, pode-se afirmar que, sempre a questão ambiental e a sustentabilidade de um projeto de mineração oceânica deverão estar presentes. Os estudos ambientais devem ser iniciados desde as etapas conceituais, devendo ser aprofundados à medida que o projeto avança em detalhes. Desde as primeiras negociações com governos, com comunidades, com órgãos legisladores etc., o assunto ambiental deverá estar na pauta. As mineradoras submarinas deverão ter o conceito da sustentabilidade de seus projetos claramente delineado e exposto para a sociedade. Assim, mais pessoas poderão apoiar e fiscalizar o projeto e sua operação.

Este é o momento propício para fomentar o conceito sustentável da mineração oceânica; ela está nascendo, e certamente trará riqueza e melhor qualidade de vida às sociedades futuras.

4.1.7.2 Alemanha

Através do Instituto Federal para Geociências e Recursos Naturais (*Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe -BGR*), baseado em Hannover, os recursos minerais em águas submarinas profundas incluem ocorrências de fosforitos, areia, cascalho e minerais pesados. Os depósitos minerais de águas profundas podem ser classificados em três categorias:

Nódulos polimetálicos, também chamados de nódulos de manganês, devido ao seu alto teor de manganês, possuem coloração castanho-escuro, formatos irregulares a arredondados formando concreções de cerca de 1 a 6 cm. Eles

ocorrem em áreas de águas profundas, onde as taxas de sedimentação são baixas, e se formam devido à precipitação de óxidos de manganês e ferro, e inúmeros outros metais maiores e traços, contidos na água do mar, bem como nas águas expelidas dos poros de sedimentos. As taxas de crescimento são extremamente baixas, com valores variando entre cerca de 2 e 100 mm por milhão de anos. Os maiores e mais importantes depósitos são encontrados no nordeste do Pacífico (entre as zonas de fratura do Clarion e Clipperton), onde normalmente cerca de 50% da superfície do sedimento é coberto por nódulos de manganês (Figura 72).

Figura 72 – Nódulo de manganês recuperado por veículo remoto no Oceano Pacífico

Fonte: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2014).

Os metais mais economicamente relevantes contidos nos nódulos são o cobre, níquel e cobalto.

Crostras ferro-manganês ricas em cobalto são camadas de óxidos de Mn-Fe que se formam nas superfícies rochosas nos flancos e nos cumes das montanhas submarinas e sulcos, e normalmente não passam de alguns centímetros de espessura. Uma análise detalhada dos depósitos globais e regionais de crostras de manganês e seus conteúdos de metal tem mostrado que os depósitos mais espessos e economicamente mais interessantes ocorrem em profundidades entre 800 e 2.500 m. Cerca de 66% de todos os depósitos conhecidos são encontrados no Pacífico (especialmente na porção oeste do Pacífico Central), cerca de 23% no Atlântico e apenas 11% no Oceano Índico. Estima-se que existam cerca de 40 milhões de toneladas deste minério (base seca) no fundo do mar, dos quais

praticamente a metade é considerada potencial alvo da mineração oceânica. Adicionalmente ao cobalto, essas crostas (Figura 73) são uma fonte importante de níquel, manganês, titânio, cobre e cério, e também de metais traço, como platina, molibdênio, telúrio e tungstênio.

Figura 73 – Crosta cobaltífera em um substrato hialoclástico retirado do Oceano Pacífico (espessura de cerca de 8 cm)

Fonte: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2014).

Sulfetos hidrotermais polimetálicos estão sempre associados a estruturas vulcânicas marinhas. Também são conhecidos por "*black smokers*" e caracterizam zonas hidrotermais ativas, em profundidades de até 3.000 m. Os fluidos hidrotermais aquecidos são descarregados através destes *black smokers* e misturam-se com a água do mar circundante, sendo que os sulfetos metálicos são precipitados para as chamadas "chaminés" gerando, no fundo do mar, depósitos minerais que podem atingir centenas de metros. Altas concentrações de metais básicos (cobre, chumbo e zinco) e metais preciosos (ouro, prata), assim como metais de alta tecnologia, como índio, germânio, bismuto e selênio fazem destes, depósitos economicamente atraentes.

A Alemanha, com baixa disponibilidade de depósitos de tais minerais tem grande interesse em obter licenças para exploração e extração de minérios em águas internacionais, submetendo os pedidos à Autoridade. O Instituto Federal para Geociências e Recursos Naturais da Alemanha realiza pesquisas de exploração de nódulos de manganês no nordeste equatorial do Pacífico, após a assinatura de um

contrato de 15 anos de exploração com a Autoridade em julho de 2006. Além disso, há interesse em solicitar também um pedido de exploração de sulfetos polimetálicos.

A Figura 74 apresenta uma chaminé hidrotermal inativa no fundo do mar.

Figura 74 – Chaminés hidrotermais inativas no fundo do mar de Lau Basin
(Oceano Pacífico)

Fonte: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2014).

A Alemanha realiza estudos ambientais em suas áreas licenciadas no noroeste do Oceano Pacífico, sendo que as amostras analisadas indicam uma grande abundância e alta diversidade na fauna marinha. O inventário da diversidade de espécies e densidade populacional da fauna no assoalho marinho constitui uma importante contribuição para a determinação regional de espécies dentro de toda a faixa que contém os nódulos manganésíferos. Com base em tais dados, a ISA pretende estabelecer nove áreas de preservação de 400 x 400 km cada (as chamadas "áreas de especial interesse ambiental") que juntas, cobrem cerca de 30% da área total do cinturão de nódulos de manganês. Estas zonas devem salvaguardar a biodiversidade e o funcionamento do ecossistema no mar profundo e irá melhorar a recolonização de áreas lavradas após possíveis futuras atividades de mineração.

As condições ambientais extremas dentro do ambiente de água salgada do mar profundo, com pressões de cerca de 50 MPa e temperaturas da ordem de 1 - 2 °C, necessitam de uma tecnologia extremamente resistente para a mineração de nódulos de manganês. Um componente importante para esse tipo de tecnologia é

um veículo coletor de autopropulsão, que está sendo desenvolvido pela Aker Wirth GmbH em nome do BGR (Figura 75).

Figura 75 – Modelo desenvolvido pela Aker Wirth GmbH para coleta de nódulos de manganês¹⁷

Atualmente, o BGR está trabalhando em conjunto com a Universidade do Norte da Vestfália (*Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen* – RWTH) e Universidade Jacobs de Bremen em um conceito para o processamento metalúrgico de nódulos de manganês.

4.1.7.3 Bélgica

Segundo Martins (2009b), devido à sua pequena área territorial e escassez de alguns recursos naturais, a Bélgica tem carência por materiais de construção, principalmente areia e cascalho. Esses bens minerais são geralmente extraídos do Mar Territorial ou da Zona Econômica Exclusiva do país. O governo é o órgão que define quais áreas podem ser mineradas, após avaliação de impacto ambiental.

Em 2004, houve mudanças na legislação belga para a extração de areia e cascalho em ambiente marinho. Com a nova lei, o Ministério de Negócios

¹⁷ Veículo alemão para extração de nódulos manganésíferos. Disponível em: <http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/MarineRohstoffforschung/Meeresforschung/Bilder/lizenzgebiete-kollektor_g.html;jsessionid=A1BEE651A81981D2715A4F1D4E1118E1.1_cid334?nn=1552604>. Acesso em: 24 maio 2014.

Econômicos somente autoriza a exploração desses bens se o ministério responsável pelo ambiente marinho der parecer positivo. Além disso, foi criada uma comissão consultiva para coordenar e administrar a exploração mineral, tanto no continente, quanto no mar.

O mar tem importância estratégica para o país, tanto para a obtenção de minerais como os citados, quanto para as constantes dragagens para acesso de navios aos seus portos, para disposições de cabos e dutos para o transporte de gás e eletricidade, e até mesmo para a instalação dos moinhos de vento em alto mar para a contribuição com o suprimento de energia. Assim, o controle ambiental sobre as atividades marítimas e, especialmente as de mineração, são bastante rígidas (MARTINS, 2009b).

4.1.7.4 Japão

Kato et al. (2011) citam que elementos de terras-raras são cruciais para as novas tecnologias eletrônicas e também no que tange a importante tecnologia da energia verde. Professor Kato e sua equipe do Departamento de Inovação de Sistemas da Universidade de Tóquio descobriram um novo tipo de recurso mineral chamado REY (*rare-earth elements and yttrium*). Este material estaria presente em um tipo especial de lama, distribuído em grandes áreas, ao longo de uma parte do Oceano Pacífico, podendo conter até 0,2% em peso. Essa lama rica em REY ocorre no Centro-norte e Sudeste do Oceano Pacífico, na espessura média de cerca de 24 m e 8 m, respectivamente. Os estudos do Professor Kato apontam que os depósitos de REY nesta região do Pacífico podem chegar a 1.000 vezes mais que as reservas atuais de REY no continente, dependendo da continuidade estratigráfica local e espessura das camadas. A absorção por materiais provenientes de fontes hidrotermais parece ser o fator responsável pelo elevado teor de REY nestas lamas. Estudos iniciais apontam que REY pode ser facilmente recuperado por simples lixiviação ácida, sendo estes estudos um campo interessante ainda em desenvolvimento.

A Figura 76 representa as áreas promissoras de lamas ricas em REY, estudadas pela Universidade de Tóquio.

Figura 76 – Regiões promissoras para aproveitamento de elementos de terras raras pelos japoneses

Fonte: Kato et al. (2011).

4.1.7.5 China

De acordo com Minghua (2006 apud MARTINS, 2009b), o Serviço Geológico da China (*China Geological Survey* - CGS) tornou-se a agência geocientífica mais importante do país, desde sua reestruturação em 1999, passando a ter responsabilidade pela investigação geológica básica, estratégica e pública, além da exploração mineral em todo o território chinês.

O trabalho de geoinformação desenvolvido pelo CGS objetiva:

- Implantar a informatização no serviço geológico, incluindo a aquisição de dados de campo, processamento e gerenciamento do banco de dados, taxação sobre os recursos minerais e disseminação da informação;
- Fortalecer a construção das bases de dados geológicas fundamentais;
- Padronizar os trabalhos de modelamento de dados geológicos.

O governo chinês considera que as investigações marinhas contribuem para a descoberta de novas fontes de recursos, levando ao desenvolvimento de tecnologias e equipamentos avançados para pesquisas do mar. Este mesmo governo também considera que o estudo marinho contribui para o entendimento e para soluções de

questões relacionadas ao clima e ao meio ambiente (JIN, 2008 apud MARTINS, 2009b).

Assim, as pesquisas no fundo do mar constituem interesse nacional em termos econômicos, científico-tecnológicos e políticos (MARTINS, 2009b).

No ano de 1990, foi criada a *China Ocean Mineral Resources Research and Development Association* (COMPRA). Sua missão é descobrir novas fontes de recursos minerais estratégicos para o país, promovendo o desenvolvimento de uma nova indústria de alta tecnologia para o futuro, além de desenvolver atividades no leito marinho internacional.

A COMPRA tem por principal função a coordenação dos diferentes departamentos, institutos e entidades da nação em suas atividades na Área. Desde 1991, a COMPRA realizou cerca de vinte expedições oceânicas, objetivando o estudo de nódulos polimetálicos, crostas ricas em cobalto e concentrações de sulfetos polimetálicos. Em 2001, a COMPRA assinou contrato para exploração de nódulos polimetálicos em associação com a Autoridade (MARTINS, 2009b).

4.1.7.6 Coreia do Sul

A Coreia tem uma enorme dependência da importação de metais, principalmente manganês, cobalto, níquel e cobre, colocando o país em situação de vulnerabilidade em eventual choque externo. Assim, o governo sul-coreano considera seriamente a exploração de minerais dos fundos oceânicos como uma opção para o seu abastecimento em determinados metais, como os acima citados, e decidiu desenvolver tecnologia própria para a mineração marinha em grandes profundidades, tendo iniciado este programa no início dos anos 1980 (MARTINS, 2009b).

Entre os anos de 1982 e 1991, o governo sul-coreano avaliou o desenvolvimento da mineração em fundos oceânicos pela primeira vez e estabeleceu um marco de referência das técnicas para a extração mineral desses fundos através de um programa internacional de cooperação.

Entre os anos de 1992 e 1994 o governo sul-coreano decidiu conduzir o programa de desenvolvimento mineral dos fundos dos oceanos, construindo um

navio oceanográfico que realizou um levantamento regional para nódulos de manganês em uma área de 1,3 M de km².

Entre os anos de 1995 e 2002, o governo sul-coreano assinou contrato com a Área em 75×10^3 km² na região de Clarion e iniciou levantamento para crostas ricas em cobalto e sulfetos maciços, e desde então, realiza estudos para o desenvolvimento de tecnologias aplicáveis à mineração e ao processamento de minérios de manganês. Este mesmo governo executa trabalhos para detalhamento e seleção de sítios economicamente explotáveis e levantamentos regionais para crostas ricas em cobalto em oceano aberto e para sulfetos maciços em Zonas Econômicas Exclusivas de várias nações-ilhas do sul do Pacífico, tendo recebido em 2008, licença para prospectar sulfetos do Governo de Tonga. Outras ilhas em perspectiva são a Micronésia, Papua Nova Guiné, Salomão e Fiji (MARTINS, 2009b).

4.1.7.7 Índia

O *Geological Survey of India* (GSI) foi criado oficialmente em 1856, mas somente depois da independência do país da Inglaterra (1947) o órgão passou a atuar mais intensamente na exploração mineral. Em 1951, foi lançado o primeiro plano para o desenvolvimento da geologia no país, com utilização de fotografias aéreas dos levantamentos geológicos e exploração mineral. Posteriormente foram introduzidas técnicas de prospecção geoquímica, geofísica, sondagens e realização de análises químicas nas amostras coletadas.

Com relação ao atual interesse do país na exploração mineral oceânica, o GSI está focando a região da Bacia Central Indiana, no Oceano Índico (MARTINS, 2009b).

4.1.7.8 Mineração de diamantes na costa da Namíbia

O início das operações de extração de diamantes aluvionares no assoalho marinho da costa da Namíbia data de 1958. As primeiras extrações dos sedimentos não ocorriam em profundidades maiores que 35 metros. Até os anos 1980, as técnicas de extração deste material não evoluíram muito, quando técnicas para

extração em maiores profundidades foram desenvolvidas, mas esta indústria passou a tomar forma a partir dos anos 1990.

A mineradora De Beers explora diamantes no assoalho marinho a profundidades que variam entre 90 a 140 metros na costa da Namíbia. O Rio Orange (Orange River) carregou diamantes do centro da África do Sul para a costa do Oceano Atlântico, depositando este valioso bem mineral no fundo do mar. Segundo a De Beers, a operação é realizada a 35 km de distância da costa, por meio de cinco embarcações especializadas em extrair e pré-beneficiar o material por meio de operação de peneiramento. O pré-concentrado rico em diamantes é transportado por helicópteros para o beneficiamento final, no continente. Apoiada por investimento de longo prazo e tecnologia inovadora, a mineração de diamantes marinha na Namíbia atingiu recentemente um marco, superando os volumes anuais produzidos por atividades de mineração de diamantes em terra do país.

A De Beers utiliza dois métodos diferentes para as operações marítimas ao longo da costa sudoeste da Namíbia:

- a) Mineração Marinha Horizontal: utiliza-se de um grande veículo subaquático (*crawler*) que extrai cascalhos diamantíferos, cobrindo grandes áreas. Este equipamento é dotado de mangueiras flexíveis para possibilitar sua operação no fundo do mar e transportar o minério para a superfície (Figura 77).

Figura 77 – Extração de diamantes na costa da Namíbia pelo método de Mineração Marinha Horizontal

Fonte: Diamond Fields International (2014).

- b) Mineração Marinha Vertical: utiliza-se de uma broca de grande diâmetro para perfurar o assoalho marinho e extrair os cascalhos portadores de diamantes (Figura 78). Esta técnica, apesar de não cobrir extensas áreas como o método em que se utiliza o *crawler*, é capaz de encontrar diamantes em profundidades maiores.

Figura 78 – Extração de diamantes na costa da Namíbia pelo método de Mineração Marinha Vertical

Fonte: Diamond Fields International (2014).

A De Beers informa que realiza estudos ambientais e faz levantamentos no fundo do mar para avaliar o impacto das operações de mineração sobre a diversidade biológica do ambiente marinho.

A Figura 79 apresenta o tipo de embarcação utilizada pela De Beers para realizar a extração e o pré-beneficiamento mineral embarcado.

Figura 79 – Embarcação utilizada pela De Beers para realizar mineração oceânica de diamantes na costa da Namíbia

Fonte: The Art of Dredging (2013).

Existe um terceiro método de extração de diamantes na costa da Namíbia, mas atualmente é muito pouco utilizado. Trata-se do método de dragagem por sucção ou airlift, que consiste na utilização de vácuo criado por um compressor embarcado, sugando assim os sedimentos para dentro da embarcação, onde ocorre o pré-beneficiamento. A Figura 80 apresenta o esquema da extração por sucção.

Figura 80 – Extração de diamantes na costa da Namíbia pelo método de Dragagem por Sucção

Fonte: Diamond Fields International (2014).

4.1.7.9 Indonésia

Por muitos anos o Estado indonésio detinha monopólio sobre a mineração de minerais estratégicos. Os minerais portadores de estanho eram classificados como estratégicos até 1980. A partir de 1998 foi permitida a mineração de estanho em pequena escala e somente em 2009 o Governo sancionou uma nova lei nacional de mineração permitindo que a mineração se estabelecesse em praticamente todas as áreas, incluindo florestas e mar. As operações de extração de estanho na Indonésia são controversas e muitas delas alvo de ambientalistas.

A empresa estatal PT Timah (Persero) Tbk é a maior empresa de mineração de estanho na Indonésia, bem como maior exportador mundial, sua sede fica em Pangkalpinang, na ilha de Bangka.

A área de operações da PT Timah cobre a província de Bangka Belitung e parte das Ilhas Riau, tanto *onshore* quanto *offshore*. A extração mineral se dá por meio de dragas com elevadores de caçambas e tem capacidade de escavação de 3,5 milhões de metros cúbicos por mês, operando em profundidades que variam de 15 a 50 metros (Figura 81). A concentração mineral é realizada através de espirais de Humphreys. A fim de aumentar sua capacidade de produção *offshore*, a PT Timah constrói dragas de corte e sucção com potencial de escavação de até 25 metros abaixo do nível do mar.

Figura 81 – Extração de estanho no mar da Indonésia

Fonte: Industrial Technology Research Institute (2014).

4.1.7.10 Brasil

Fernandes (2012), através do Centro de Excelência para o Mar Brasileiro (Cembra), coordenou e preparou um relatório, fruto dos resultados obtidos por uma série de estudos relativos aos depósitos minerais brasileiros no mar. A seguir são apresentados os pontos mais relevantes para a atual mineração oceânica no Brasil.

a) Minerais não metálicos

Na margem continental brasileira, encontram-se depósitos naturais de sais minerais produzidos pela evaporação de grandes volumes de água, como os evaporitos. Foram formados há mais de 100 milhões de anos e compostos por substâncias como anidrita, gipsita, halita, potássio e sais de manganês. Os evaporitos foram encontrados desde a bacia de Alagoas até o platô de São Paulo. Estes sais podem se apresentar como “domos” cilíndricos (resultantes do movimento ascendente de massa salina) ou como “almofada” (similar ao domo, porém mais achatado), respectivamente, ocorrendo nas porções norte e sul da bacia evaporítica.

Foram identificados em Sergipe e na bacia de Alagoas sais de potássio e de magnésio, apresentando de 15 a 50 m de espessura a três mil metros de

profundidade. A mesma pesquisa geológica apresentou ocorrência de domos salinos, com grande conteúdo de halita, em Barra Nova, no litoral do Espírito Santo.

Todas as bacias com hidrocarbonetos tendem a conter também enxofre. O elemento, na forma de sulfeto, pode estar em camadas estratificadas ou presente em rochas, revestindo domos salinos. No Brasil, depósitos de sulfeto podem ser encontrados ao norte de Abrolhos. Três domos estão entre 60 e 70 km da costa, em profundidades de 20 a 30 m.

b) Materiais metálicos

Minerais pesados estão presentes ao longo da costa brasileira, do Piauí ao Rio Grande do Sul. Atividades de extração de ilmenita, rutilo, monazita e zircônio são realizadas atualmente na Paraíba, na Bahia, no Espírito Santo e no Rio de Janeiro. Existem estudos de ocorrência de ilmenita, zircão e monazita em diferentes localidades da plataforma continental do Brasil; assim como para identificação de elementos de alto valor econômico tais como titânio, zircônio, cério, lantânio, neodímio, tório, ouro, diamante e fósforo. Estima-se que o depósito de Cumuruxatiba (BA) contém 171 mil toneladas de ilmenita, 4 mil toneladas de monazita e 365 mil toneladas de zircônio e rutilo. Na zona costeira do Rio Grande do Sul foram encontrados, na região de Bujuru, depósitos de minerais pesados, cujo potencial estimado é de 40 milhões de toneladas, constituindo de depósitos alongados, de 18 km de comprimento com largura de 30 a 100 m.

Nódulos polimetálicos foram detectados após pesquisas no platô de Pernambuco. Na ocasião foram recuperados 150 kg deste material, predominantemente constituído em nódulos com densa cobertura metálica e com diâmetro variando de 2 a 12 cm. Após análises destes nódulos, constatou-se que cerca de 90% deles apresentavam um núcleo de rochas fosfáticas com camadas concêntricas de 0,5 a 0,7 cm de espessura. Pesquisas recentes apontam áreas promissoras para extração de nódulos polimetálicos em alto mar, incluindo a bacia adjacente à Ilha de Trindade.

c) Fatos portadores de futuro

Fernandes (2012) denomina “fatos portadores de futuro” como, em termos prospectivos, aqueles sobre os quais ainda não se detém controle e que

determinarão situação inevitável, ou que demandará providências para minimizar possíveis efeitos negativos ou, ao contrário, maximizar seus efeitos positivos.

Foram identificados, em âmbito brasileiro, os seguintes fatos:

- Corrida internacional para a requisição de direitos de exploração mineral na Área: nas últimas décadas, várias empresas de mineração envolveram-se diretamente na prospecção de nódulos polimetálicos no assoalho marinho. Cerca de 2.000.000 km² de áreas de títulos de mineração já foram emitidos no Oceano Pacífico e no Oceano Índico, para a exploração desses recursos. Outras áreas já estão sendo requeridas no Oceano Índico para exploração de sulfetos polimetálicos. Assim que a Autoridade concluir a elaboração de regulamentos internacionais para a exploração de crostas cobaltíferas, outras áreas de mineração também poderão ser requisitadas para a exploração, incluindo áreas do Atlântico Sul, localizadas em frente à plataforma continental;
- Crescente exploração em águas cada vez mais profundas: o desenvolvimento de tecnologia marinha tem possibilitado ao homem atingir regiões cada vez mais profundas nos oceanos. Trata-se de um componente político-estratégico importante para os países que queiram ampliar sua influência na área internacional dos oceanos. É importante que se inicie um trabalho de cooperação técnica com os países que detêm tecnologia mais avançada, ou seja, que já realizam estudos em águas profundas;
- Erosão costeira: a erosão costeira trará uma série de danos à zona costal do Brasil, portanto é necessário considerar, a reconstrução praial;
- Exaustão das reservas continentais e restrições ambientais para a mineração de agregados: areia e cascalho provenientes do leito marinho podem se tornar importantes para suprir à demanda nacional de agregados, substituindo operações continentais por operações mais sustentáveis no mar. Os minerais podem ser extraídos e desembarcados em áreas próximas aos centros metropolitanos, aliviando o transporte por longas malhas rodoviárias;

- Crescente dependência nacional de fertilizantes importados: há previsões de que este assunto possa se tornar um entrave ao agronegócio e sua rentabilidade. O aproveitamento de depósitos marinhos de granulados bioclásticos, como fosforita e sais de potássio poderá reduzir a dependência das importações destes insumos.

d) Resumo do panorama brasileiro em relação à mineração oceânica

Fernandes (2012) compilou as mais relevantes informações dos estudos, traduzindo os resultados para valores socioeconômicos e político-estratégicos que os recursos minerais marinhos têm para o Brasil, definindo prioridades de ação por parte do Governo Nacional e iniciativa privada.

O Quadro 4 apresenta dos dados em relação ao valor socioeconômico dos minerais, enquanto o Quadro 5 apresenta os resultados pela questão político-estratégica.

Quadro 4 – Minerais de valor socioeconômico para o Brasil

Assunto	Recurso mineral	Urgência	Importância	Valor agregado	Prioridade
Recuperação de Praias	Areia e cascalhos	Alta	Alta	Alto	1
Suprimentos à construção civil	Areia e cascalhos	Alta	Alta	Alto	1
Fertilizantes e indústrias em geral	Granulados bioclásticos (carbonatos)	Alta	Alta	Alto	1
Fertilizantes e indústria química	Fosfatos e sais de potássio	Alta	Alta	Alto	1
Diversos (placeres)	Minerais pesados	Média	Alta	Alto	2
	Carvão	Média	Alta	Alto	2
Energia	Hidratos de gás	Baixa	Alta	Alto	3
Fertilizantes e química	Enxofre	Média	Alta	Médio	3
Alimentação e cloroquímica	Sal-gema	Baixa	Média	Alto	4

Fonte: Fernandes (2012).

Quadro 5 – Minerais de valor político-estratégico para o Brasil

Assunto	Recurso mineral	Urgência	Importância	Valor agregado	Prioridade
Minerais político-estratégicos	Crostras cobaltíferas	Alta	Alta	Alto	1
Minerais político-estratégicos (biotecnologia)	Sulfetos polimetálicos	Média	Alta	Alto	2
Minerais político-estratégicos	Nódulos polimetálicos	Baixa	Alta	Intermediário	3

Fonte: Fernandes (2012).

Segundo Martins (2009a), a companhia estatal brasileira CPRM (Serviço Geológico do Brasil) tem investido em estudos tecnológicos e operacionais para atender às demandas brasileiras relativas ao conhecimento geológico e à avaliação da potencialidade mineral da Plataforma Continental Jurídica Brasileira (PCJB) e áreas oceânicas adjacentes do Atlântico Sul e Equatorial.

Possui dois principais programas relacionados com a geologia marinha:

- a) Programa de Avaliação da Potencialidade Mineral da Plataforma Continental Jurídica Brasileira (Remplac);
- b) Programa Área Internacional do Atlântico Sul e Equatorial (Proarea).

A CPRM também ampliou nos últimos anos seus projetos de geologia marinha, sendo eles:

- a) Geologia da Plataforma Continental Jurídica Brasileira, organizado em Sistema de Informação Geográfico;
- b) Levantamento Geológico e Avaliação da Potencialidade Mineral da Plataforma Continental Norte Brasileira;
- c) Aluviões Diamantíferos da Foz dos Rios Pardo-Salobro e Jequitinhonha;
- d) Fosforitas Marinhas da Plataforma Continental (Fosfomar);
- e) Mapeamento Geológico e Avaliação da Potencialidade Mineral de Crostras Cobaltíferas da Elevação do Rio Grande;

- f) Projeto de Prospecção e Exploração de Sulfetos Polimetálicos da Cordilheira Meso-Atlântica (Procordilheira).

4.1.7.10.1 Operações brasileiras de dragagem mineral

a) Extração de estanho em Rondônia

De acordo com Figueiredo Filho e Souza (1994), a dragagem é um método largamente utilizado para exploração aluvionar de cassiterita na região amazônica, sendo ainda utilizada para lavra de outros minerais presentes em aluviões, como ouro e diamante. A Figura 82 apresenta uma operação típica de dragagem de cassiterita no estado de Rondônia.

Figura 82 – Lavra de cassiterita em Rondônia

Fonte: Figueiredo Filho e Souza (1994).

Na lavra de depósitos com potencial superior a $1 \times 10^6 \text{ m}^3$, utiliza-se um conjunto composto por uma escavadeira sobre flutuador e uma planta flutuante.

Para depósitos com potencial superior a $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ utiliza-se o conjunto draga e planta flutuante. Para a realização da operação de lavra, divide-se a área alagada no sentido do comprimento a cada 20 m. No sentido da largura, é dividida a cada 36 m. Servindo como orientação ao corte, é comum utilizar-se de boias espaçadas a cada 12 m. Quando a espessura do aluvião for superior a 4 m, o avanço da lavra se

faz em duas etapas, avança-se 20 m na espessura superior do bloco, recuando 20 m para em seguida avançar 20 m na camada inferior. A draga é dotada de um sistema de guinchos presos através de cabos de aço e árvores ou mourões situados às margens, sendo este sistema responsável pelo avanço lateral da draga. O avanço frontal é feito por um sistema chamado *spud carriage*, podendo ter um curso de 4 m.

As plantas flutuantes são compostas por um conjunto de equipamentos, geralmente *trommel*, hidrociclones e jiques para realizar a concentração mineral. A planta flutuante tem por objetivo obter um pré-concentrado, que é transportado por caminhões até a usina de beneficiamento.

A questão ambiental é bastante discutida nos casos de extração aluvionar. Na região amazônica, qualquer ação antrópica contrasta com o meio natural, podendo provocar sérias consequências. Devido à pequena espessura de camada vegetal superficial e à presença de grandes extensões de solos pouco férteis, a atividade mineradora na região precisa adotar medidas mitigadoras específicas. As áreas impactadas devem ser revegetadas com espécies arbóreas nativas preferencialmente. Já em regiões íngremes, como barragens e taludes, pode-se optar pelo processo de hidrossemeadura. As áreas alagadas já lavradas são adequadas à piscicultura, podendo funcionar como fonte de renda da população local. Nessa região, uma forma muito utilizada de revegetação é a da “sucessão natural induzida”, que busca repetir nas áreas lavradas o mesmo processo que ocorre naturalmente em clareiras. A revegetação é iniciada com espécies pioneiras nativas e, posteriormente vai sendo enriquecida com espécies secundárias. A qualidade das águas é um fator muito importante e deve ser objeto de um trabalho permanente de monitoramento, pelas implicações que pode causar à biota (FIGUEIREDO FILHO; SOUZA, 1994).

b) Extração de diamantes em Minas Gerais

Segundo Chaves e Chambel (2004), o rio Jequitinhonha, em seu médio curso no estado de Minas Gerais desenvolve aluviões largos, muitas vezes alcançando 1.000 m de largura, onde as companhias Tejucana e Rio Novo operam diversas dragas de alcatruzes, acompanhadas, respectivamente, de dragas de sucção. No processo minerador, a draga de sucção segue à frente retirando o capeamento arenoso, estéril, enquanto a draga de alcatruzes, em seguida, escava, recolhe e

trata o cascalho basal do depósito, rico em diamantes (ouro também é recuperado como subproduto).

A Figura 83 mostra as operações de dragagem de cascalhos diamantíferos no Rio Jequitinhonha, em Minas Gerais.

Figura 83 – Operações de dragagem de diamantes no Rio Jequitinhonha, Minas Gerais

Fonte: Chaves e Chambell (2004).

c) Dragagem de areias de praias

A dragagem de areias de praias é uma atividade relativamente comum, especialmente nos países no norte europeu, que detêm grande conhecimento sobre esta técnica.

Martins e Nunes (2007) afirmam que os agregados marinhos desempenham importante papel na recuperação de praias atacadas por problemas de erosão.

No Brasil, recentemente, pode-se citar o caso da dragagem para reconstrução das praias de Jaboatão dos Guararapes (Recife, PE). A ação que se iniciou em 2013 deixará as praias com uma média de 30 a 45 metros em uma extensão de 5,8 km onde estão localizados pontos críticos e servirá para conter o avanço do mar. Para devolver a faixa de areia às praias de Piedade, Candeias e Barra de Jangada, estão sendo movimentados quase um milhão de metros cúbicos de areia. A areia está sendo retirada de uma jazida localizada na costa do Cabo de Santo Agostinho, a aproximadamente 14 km de distância do litoral.

A orla central do Balneário Piçarras (SC) também está sendo reconstruída desde 2013. O objetivo é aumentar a faixa de areia, bombeando areia do fundo do mar para a superfície. O projeto de reconstrução da praia prevê a dragagem de $5 \times 10^5 \text{ m}^3$ de areia, deixando a praia com cerca de 30 metros de largura. A dragagem se fez necessária devido ao avanço do mar, que fez praticamente desaparecer a areia em alguns trechos. A operação se inicia a aproximadamente 12 km de distância da costa, onde a areia é extraída do fundo do mar por um braço mecânico e é bombeada até a praia por meio de uma tubulação submersa instalada perto da praia.

Em 2014, pode-se citar o caso da dragagem do Porto de Paraguaguá (PR). Cerca de $1,2 \times 10^6 \text{ m}^3$ de areia foram transportados para a recuperação das praias Brava, Caiobá, Riviera e para o município de Matinhos que foram afetados pela ação do avanço das marés.

4.2 AREIA

Areia é um bem mineral extremamente importante para o desenvolvimento e o conforto do homem na Terra. A areia possui múltiplas utilidades nas indústrias, sendo suas características e propriedades específicas seus principais diferenciais no mercado consumidor.

4.2.1 Definições

A seguir são apresentadas as principais definições do termo areia, bem como de termos correlatos.

Areia: De acordo com Nava (1986), areia é um termo para o qual existe um grande número de definições. Essas definições podem ser baseadas nas características texturais, composições mineralógicas, dimensões de suas partículas ou na interação de todas essas características. Uma das conotações mais aceitas para o termo “areia” é granulométrica, embora também seja possível definir areia como uma massa mineral inconsolidada de alto teor de sílica, constituída de grãos minerais predominantemente de quartzo, cujas formas e texturas superficiais podem

variar amplamente, situando-se dentro da faixa de tamanhos entre 0,0625 mm e 2,0 mm.

Existe uma preocupação tanto no sentido de definir uma faixa de tamanho de partículas, como no sentido de classificar os depósitos nos quais as partículas do tamanho “areia” estão presentes juntamente com partículas de outras dimensões, baseando-se nas proporções entre essas diferentes partículas, como pode ser observado na Figura 84.

Figura 84 – Classificação granulométrica de materiais arenosos

Fonte: Pettijohn, Potter e Siever (1972).

Pettijohn, Potter e Siever (1987) denominam areia como um material granular solto, não coesivo, cujos grãos ou elementos estruturais devem ter, por definição, “tamanho de areia”.

Guerra e Guerra (2008) definem as areias como grãos essencialmente de quartzo resultantes da desagregação ou da decomposição das rochas com sílica em suas composições.

Nava (1997) também define areia como um material detrítico com variação de tamanho de partículas definidos, e também como depósito detrítico silicoso composto principalmente por partículas de quartzo. Areia também se apresenta como um material com características favoráveis à acumulação de recursos naturais como petróleo, água e minérios radioativos.

Já a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1993), através da Norma Brasileira NBR 7225, definiu areia como sendo “material natural, de propriedades adequadas, de dimensão nominal máxima inferior a 2,0 mm e de

dimensão nominal mínima igual ou superior a 0,075 mm”. Esta definição é contestada por Hermann (1992), quando se atribui o adjetivo “natural” ao termo “material”. Areias também podem ser produzidas pelo homem, através de processos de cominuição de rochas sãs. Segundo Mattos et al. (2005), areias artificiais podem ser produzidas a partir de subprodutos resultantes da lavra de pedreiras e unidades de britagem, sendo utilizadas como matéria-prima na construção civil para a produção de concreto betuminoso e pré-moldados. Estes materiais, se devidamente processados, podem substituir a areia natural.

Embora as areias sejam formadas basicamente por grãos de quartzo, outros minerais podem estar presentes, mais comumente o feldspato, mica, ilmenita, turmalina, granada e o zircão. A proporção com que esses minerais se apresentam nas areias confere às mesmas características especiais, como coloração, composição mineralógica, composição química e resulta por atribuir às mesmas denominações específicas.

Segundo Luz e Lins (2008), os termos areia industrial, areia de quartzo, areia quartzosa ou mesmo areia de sílica (*silica sand*) são atribuídos geralmente a areias que apresentam alto teor de sílica, SiO_2 , na forma de quartzo.

Resumidamente, uma boa definição para o termo “areia” seria como um material granular, não coesivo, situado na faixa granulométrica de 0,0625 mm a 2,0 mm (NAVA, 1979).

Ainda dentro do conceito granulométrico, as areias e os materiais de tamanho próximo podem ser subdivididos e classificados conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Conceito granulométrico de areias

PENEIRAS PADRÃO MESH		MILÍMETROS		UNIDADES fi (φ)	CLASSIFICAÇÃO WENTWORTH
CASCALHO		4096		-12	MATAÇÃO
		1024		-10	
		256	256	-8	
		64	64	-6	BLOCO
		16		-4	
	5	4	4	-2	SEIXO
	6	0.00006		-1.75	
	7	2.03		-0.5	
	8	2.38		-0.25	
	10	2.00	2	-1.0	
AREIA	12	1.68		-0.75	AREIA MUITO GROSSA
	14	1.41		-0.5	
	16	1.19		-0.25	
	18	1.00	1	0.0	
	20	0.84		0.25	
	26	0.71		0.5	AREIA GROSSA
	30	0.59		0.75	
	36	0.50	1/2	1.0	
	40	0.42		1.25	AREIA MÉDIA
	48	0.35		1.5	
	50	0.30		1.75	
	60	0.25	1/4	2.0	
	70	0.210		2.25	AREIA FINA
	80	0.177		2.5	
	100	0.149		2.75	
	120	0.125	1/8	3.0	
	140	0.105		3.25	AREIA MUITO FINA
	170	0.088		3.5	
	200	0.074		3.75	
	230	0.0625	1/16	4.0	
SILTE	270	0.053		4.25	SILTE GROSSO
	325	0.044		4.5	
		0.037		4.75	
		0.031	1/32	5.0	SILTE MÉDIO
		0.0156	1/64	6.0	
		0.0078	1/126	7.0	SILTE FINO
ARGILA		0.0039	1/256	8.0	SILTE MUITO FINO
		0.0020		9.0	ARGILA
		0.00098		10.0	
		0.00049		11.0	
		0.00024		12.0	
		0.00012		13.0	
		0.00006		14.0	

Fonte: Pettijohn, Potter e Siever (1972).

Termos sílica, silício, silicone e silicato: As definições a seguir foram compiladas da publicação especial *Crystalline Silica Primer* do Ministério do Interior (UNITED STATES OF AMERICA - USA, 1992).

Algumas definições de areia expressam que areia é um material composto basicamente de sílica. Não se pode confundir sílica com outros nomes, tais como silício, silicone, silicatos. Os quatro termos citados carregam grandes diferenças.

Silício é um elemento químico. É o segundo elemento mais comum na crosta da Terra, sendo o oxigênio o primeiro. O silício e o oxigênio em conjunto

representam aproximadamente 75% da superfície da Terra. No *senso strictu*, o silício (Si) é classificado como um não metal, mas possui algumas das propriedades associadas aos metais. Há oito elementos que estão na fronteira entre metais e não metais, sendo conhecidos como metaloides.

Uma propriedade associada aos metais, por exemplo, é a sua capacidade para conduzir eletricidade. Em altas temperaturas, o silício age como um metal e conduz eletricidade, mas em baixas temperaturas, o mesmo silício atua como um isolante. Portanto é conhecido também como semicondutor. Amplamente utilizado na fabricação de *chips* de computador e placas de circuito integrado para tais fins, o silício precisa estar na forma pura. O silício puro requerido para este uso, no entanto, não existe na natureza.

Sílica é um composto químico. O composto sílica (SiO_2) é formado a partir de silício e átomos de oxigênio. Um composto químico é definido como uma substância pura e distinta, formada pela união de dois ou mais elementos. Sendo o oxigênio o elemento mais abundante na crosta da Terra e o silício segundo mais abundante, a formação de sílica é muito comum na natureza. A sílica, substância mencionada para produzir silício puro, é feita de quartzo, e é a forma mais comum de sílica encontrada na natureza. Sílica também pode ter origem biológica, produzida por organismos minúsculos. Os principais organismos geradores de sílica são as diatomáceas (plantas) e os radiolários (animais), extraíndo sílica da água para formar suas estruturas ou conchas. Para ambos os organismos, a sílica é um nutriente necessário para a sobrevivência, eles usam a sílica dissolvida nas águas de rios, lagos e mares, proveniente de rochas sedimentares. Quando diatomáceas cultivadas em laboratório extraem toda a sílica disponível na água do aquário, elas se aderem às paredes e conseguem extrair pequenas quantidades de sílica dissolvidas ao redor de si, provenientes do próprio vidro do aquário. Na natureza, quando diatomáceas e radiolários morrem, vão para o fundo da água e se acumulam em sedimento, que pode endurecer, transformando-se em diatomita ou radiolaria. Diatomita é uma rocha utilizada comercialmente, é altamente porosa e eficaz para a filtração, bem como para o uso como material de enchimento e como abrasivo. Assim, a sílica pode ser encontrada em mais de um estado: amorfo, como nos restos de diatomáceas, e cristalino como em um cristal de quartzo. A sílica em seu estado cristalino pode ser encontrada em mais de uma forma; este fenômeno é chamado de polimorfismo (literalmente "muitas formas").

Silicatos são compostos de silício e oxigênio mais outros elementos. Quando o silício e o oxigênio se ligam com outros elementos, eles o fazem em pares. Estes emparelhamentos são chamados de tetraedros silício-oxigênio (SiO_4), pois as ligações são feitas com quatro átomos de oxigênio e um átomo de silício. Tetraedro significa "quatro faces" e refere-se à forma do composto SiO_4 . Os tetraedros silício-oxigênio se ligam mais frequentemente com sódio, potássio, cálcio, magnésio, ferro e alumínio, formando assim, os silicatos.

Silicatos constituem a classe mais abundante de minerais e são considerados como os materiais básicos a partir dos quais a maioria das rochas é formada.

Os silicones são compostos sintéticos. Os silicones são polímeros, desenvolvidos comercialmente durante a Segunda Guerra Mundial. Os silicones são formados a partir de dois ou mais átomos de silício, ligados com compostos de carbono (compostos orgânicos). A maioria dos silicones também pode conter átomos de oxigênio. Ao contrário do que acontece quando sílica e silicatos são formados, no caso dos silicones, o silício e o oxigênio não tomam a forma tetraédrica, mas em vez disso formam estruturas em cadeia, chamadas de polímeros de silicone. Polimerização é uma reação química na qual pequenas moléculas orgânicas se combinam para formar moléculas maiores, repetindo-se e mantendo as unidades estruturais das moléculas originais.

Os silicones podem variar desde líquidos (utilizados como repelentes de água e antiespumantes), agraxas e ceras (usadas como lubrificantes resistentes à água e calor) e resinas. Também podem estar no estado sólido (utilizados para fabricação de produtos especiais, resistentes ao calor e produtos químicos, incluindo tintas, borrachas e plásticos). Provavelmente o uso do silicone mais conhecido comercialmente seja para a fabricação de implantes mamários.

O “estado” cristalino: Em uma substância cristalina (como o quartzo), os átomos e as moléculas formam um padrão tridimensional de repetição. A unidade padrão se repete indefinidamente em três direções, formando a estrutura cristalina. Isto é semelhante a azulejos em parede, no qual uma unidade padrão bidimensional feita, por exemplo, de dois azulejos pretos e quatro azulejos brancos, se repete indefinidamente em duas direções. Este padrão de repetição pode ser alterado. Seria possível alterar as posições dos dois azulejos pretos e quatro azulejos brancos em relação um ao outro e ainda ter um padrão que pode ser repetido

indefinidamente em duas direções, mas o desenho resultante seria diferente. Da mesma forma, a estrutura interna do cristal pode ser alterada e a substância cristalina resultante seria então diferente.

O “estado” não cristalino: Alguns materiais amorfos podem exibir uma pequena ordem na ligação de seus átomos. Ainda utilizando a analogia do piso, supondo que os dois azulejos pretos e quatro azulejos brancos formam agora um padrão regulado por alguma regra, mas sem um padrão de repetição. A principal característica de uma substância cristalina é que a partir de qualquer parte dela pode-se conhecer o todo. Em uma estrutura sem padrões repetitivos, esta observação não é possível. Alguma ordenação de curto alcance pode existir, mas esta previsibilidade não alcança longas distâncias. Este “estado” é conhecido como vítreo, justamente pelo vidro oferecer tal característica. No processo de fabricação do vidro, após ocorrer a fusão da sílica, ele é esfriado rapidamente, não havendo tempo suficiente para que os átomos se rearranjem em uma longa estrutura repetitiva.

As areias são formadas por minerais silicosos, portanto estruturas cristalinas ricas em silício e em certos usos industriais, podem se tornar amorfas ou não cristalinas.

4.2.2 Origem das areias

Segundo Nava (1986), as areias podem ter origem orgânica, química, vulcânica ou clástica.

As areias naturais são sempre de origem secundária, ou seja, originam-se de rochas pré-existentes, ricas em quartzo, sobre as quais houve ação de agentes intempéricos, como vento, chuva, sol, gelo, águas subterrâneas, ondas, rios, plantas e fungos. Os diferentes minerais que formam diferentes tipos de rochas apresentam comportamentos distintos, frente a um agente intempérico.

O quartzo é um mineral que possui grande resistência ao desgaste, tanto físico quanto químico, desgastes estes, que as rochas da crosta terrestre podem estar sujeitas. Além disso, a maioria dos outros minerais que compõe as rochas é mais facilmente fragmentada mecanicamente e também mais facilmente atacada quimicamente. Estes minerais podem ser alterados e transportados por grandes

distâncias, o que permite a formação de um depósito residual de fragmentos, principalmente de quartzo. Outro fenômeno pode ocorrer com estes fragmentos residuais que é o seu transporte para distâncias variadas da área fonte. Durante este transporte, podem surgir fenômenos como fraturamento das partículas, retrabalhamento das superfícies como desgaste de arestas e faces, dando origem a diferentes graus de arredondamento e esfericidade; polimento ou fosqueamento das superfícies e também classificação das partículas. Estes efeitos estão diretamente ligados à energia do meio no qual as partículas foram transportadas (NAVA, 1986).

Quando, finalmente, essas partículas são depositadas, formam-se os depósitos sedimentares arenosos, cuja composição mineralógica depende basicamente das características das rochas fonte. Finalmente, estes novos depósitos formados podem sofrer diagênese e formar rochas como arenitos e quartzitos, dependendo da energia aplicada ao fenômeno.

Este ciclo pode ser repetido algumas vezes e, tais repetições levam à segregação dos minerais, podendo culminar em depósitos monominerálicos, de alto grau de pureza.

Pettijohn, Potter e Siever (1972) elaboraram um diagrama que define os processos básicos de formação de areia (Figura 85).

Fonte: Pettijohn, Potter e Siever (1972).

Pettijohn, Potter e Siever (1987) classificam areia em três tipos básicos: terrígenas, carbonáticas e piroclásticas. As areias terrígenas são as mais abundantes e são derivadas de processos deposicionais oriundos de degradação de rochas pré-existentes. Todas foram depositadas por efeito de águas, exceto as areais eólicas e são basicamente compostas por silicatos. Areias carbonáticas são geralmente depositadas em ambiente marinho e consistem primariamente por grãos formados por estruturas esqueléticas, oólitos e outros grãos. As areias piroclásticas são derivadas diretamente de explosões vulcânicas, podendo ser depositadas em solo ou águas e são as menos abundantes dos três grupos.

A areia pode ser transportada por vários agentes, ser selecionada, classificada, estratificada, acamadada e gradada horizontal e verticalmente.

A areia pode ser originada por diversos processos, descritos a seguir.

Intemperismo: Segundo Pettijohn, Potter e Siever (1972), o intemperismo pode ser subdividido em desintegração e decomposição.

A desintegração é um processo físico que enfraquece a resistência física da rocha pela desagregação de seus minerais constituintes, liberando-os.

A decomposição, por outro lado, refere-se ao processo químico através do qual, alguns dos constituintes das rochas são alterados em outros minerais de granulação mais fina.

As areias originárias destes dois eventos geológicos são denominadas **areias epiclásticas**.

Vulcanismo explosivo-piroclástico: A ação explosiva de vulcões pode produzir uma vasta gama de tamanho de partículas, geralmente amorfas (PETTIJOHN; POTTER; SIEVER, 1972).

Moagem por movimentação de rochas (Processo Cataclástico) e por impacto: Estes eventos podem provocar a moagem localizada de rochas e produzir partículas de dimensões de areia. A atividade proveniente da atividade glacial pode produzir material do tamanho de areia em quantidade suficiente para formar depósitos minerais de volumes consideráveis.

Além destes eventos, a queda de meteoros pode fragmentar e moer rochas na zona de impacto. Geralmente o material originado na cratera resultante é de granulação grosseira (PETTIJOHN; POTTER; SIEVER, 1972).

Aglomeração (peletização) de material fino (argila): São areias provenientes da decomposição física das rochas e carregadas para o interior de uma bacia de sedimentação, podendo ser aglomeradas inclusive pela ação de organismos vivos, formando pequenos agregados de material sedimentar com tamanho característico de areia (PETTIJOHN; POTTER; SIEVER, 1972).

Precipitação química e bioquímica: São areias formadas a partir de dissoluções químicas das rochas, cujos constituintes minerais se precipitam sob a forma de partículas ou oólitos. As areias assim formadas são denominadas **endogenéticas**.

Nava (1997) afirma que a gênese das areias pode se referir não apenas à dimensão das partículas, mas também à composição mineralógica. Os processos básicos que atuam na sua formação são os mesmos que atuam na formação de qualquer material granular mineral com tamanhos entre 0,0625 e 2,0 mm; portanto, cada processo ou interação de processos resultará em uma areia de composição química específica.

No caso de areias quartzosas, por exemplo, os processos genéticos foram mais seletivos e as áreas-fonte mais ricas em quartzo. O transporte do quartzo liberado da área-fonte até o local de deposição da areia foi suficiente não apenas para separá-las de outros minerais desagregados e/ou decompostos como também para classificar os grãos de quartzo do tamanho de areia (PETTIJOHN; POTTER; SIEVER, 1972).

Segundo França e Luz (2002), a sílica ocorre, na natureza, em duas formas: amorfa e cristalina. A amorfa é representada pela diatomita que consiste de uma matéria prima mineral de origem sedimentar, constituída a partir do acúmulo de carapaças de algas diatomáceas que se fossilizaram ao longo de períodos geológicos, pela deposição da sílica sobre sua estrutura.

Já a sílica cristalina pode ser encontrada, de acordo com Hanson (1999), relativamente pura, na forma de cristal de rocha, “veios” de quartzo, areia não

consolidada e consolidada como arenito e quartzito. Pode ainda ser encontrada em outras formas, tais como: ágata, calcedônia, perlita, sílex, etc.

Modo de ocorrência: As areias naturais são de origem secundária, ou seja, provêm da transformação de rochas por ação de forças intempéricas, em uma coleção de pequenas partículas. Estas partículas formam os depósitos sedimentares que por sua vez podem ser transformados, dependendo das condições a que são submetidas, novamente em rochas sedimentares ou metamórficas.

Segundo Nava (1997), em função da sua origem e dos processos naturais de transformação, areias, depósitos arenosos, ou formações geológicas portadoras de areias podem se formar em diferentes domínios geológicos, como os seguintes:

- a) **Domínio dos sedimentos e rochas sedimentares:** neste domínio estão incluídas todas as bacias sedimentares do embasamento do cristalino (intracratônicas), e as bacias da margem continental ou costeiras (pericratônicas), bem como as bacias hidrográficas do embasamento cristalino. Trata-se do domínio geológico com maiores possibilidades de ocorrência de depósitos arenosos. Neste caso, há predomínio dos processos deposicionais sobre os processos erosivos, podendo ocorrer, entre outros, sedimentos totalmente inconsolidados, como é o caso das coberturas terciárias/ quaternárias, aluviões quaternários e depósitos litorâneos. Também podem ser formados arenitos com os mais variados graus de friabilidade;
- b) **Domínio das rochas metamórficas:** este domínio representa a maior parte do embasamento cristalino brasileiro. Trata-se de áreas onde ocorrem rochas mais tenazes e um amplo predomínio dos processos erosivos sobre os deposicionais. Neste caso, as possibilidades de ocorrência de rochas que possam produzir areia são muito menores que no domínio sedimentar, ficando restritas às ocorrências de quartzitos, quando estes apresentam certo grau de friabilidade;
- c) **Domínio das rochas ígneas:** este domínio é o que oferece menor probabilidade de formação de areia. Aqui, praticamente não ocorrem grandes massas rochosas constituídas predominantemente de quartzo,

podendo este mineral ocorrer normalmente em forma de veios. O fenômeno que ocorre neste caso é uma associação de vários minerais formando rochas de grande resistência, tenacidade e dureza, tornando o processo industrial de liberação dos grãos de quartzo difícil e oneroso. Estes quartzos de veios, quando puros, podem ser utilizados para fins nobres.

Podem ser aplicados processos de britagem, moagem e separação magnética de granitos e nefelina-sienitos para a produção de uma mistura granular de quartzo e feldspatos, com possível utilização para fabricação de vidro. Este tipo especial de areia recebe o nome de areia feldspática e também tem finalidade de fornecer alumina para o processo de fabricação do vidro.

De acordo com Nava (1986), embora as maiores probabilidades de ocorrência de depósitos arenosos ocorrerem no domínio dos sedimentos e rochas sedimentares a pesquisa geológica para fins industriais nestas áreas pode ser dificultada por uma série de fatores:

- a) Ocorrência de uma gama muito grande de variações nos sedimentos;
- b) Ocorrência de grande variabilidade lateral em uma formação arenosa. As camadas sedimentares estão, predominantemente, em atitude horizontal, ou sub-horizontal, o que possibilita que uma formação sem interesse para a pesquisa geológica possa recobrir ou mascarar uma formação subadjacente interessante economicamente, em uma grande extensão de área;
- c) Ocorrência de espessas camadas de solo;
- d) Nível freático alto, ou até mesmo aflorante;
- e) Em áreas de coberturas sedimentares cenozoicas ocorre extrema escassez de afloramentos das formações subadjacentes, porém quando estes existem, são suficientes para fornecer as informações geológicas necessárias.

Pelos motivos descritos acima, para se fazer uma pesquisa geológica confiável para areia industrial, é necessário o desenvolvimento ou criação de uma metodologia própria para cada região, o que pode ser conseguido com o auxílio da

elaboração de um modelo geológico montado a partir de pesquisas bibliográficas, informações de campo e informações obtidas diretamente de minas que possam, eventualmente estarem operando na região pesquisada. A partir deste ponto, a comprovação da ocorrência do depósito mineral se dará por meio de campanhas de sondagem.

Segundo Fisher e McGowen (1967), o objetivo do desenvolvimento de um modelo deposicional em exploração mineral é de se relacionar uma ocorrência mineral a um quadro de deposição específico. Ao se reconhecerem relações semelhantes com outras sequências sedimentares, pode-se prever a ocorrência de potenciais depósitos minerais em outras áreas.

4.2.3 Usos das areias

Prelúdio

Esta seção teve por objetivo compor uma coletânea de referências bibliográficas que se encontram dispersas na literatura sobre os usos industriais das areias. A extensão desta seção se fez necessária para a composição da “obra de referência” proposta nos objetivos desta Tese.

Nava (1986) observa que alguns bens minerais são tão abundantes na superfície da Terra que, para a maioria das pessoas, não apresentam importância. Ao serem analisados de uma maneira mais profunda (ou tecnológica), estes materiais apresentam características e propriedades tão singulares que possibilitam sua utilização das mais variadas maneiras, inclusive com propósitos bastante nobres. Este fenômeno ocorre com a areia, substância mineral das mais abundantes na natureza e das mais baratas. Ainda hoje, as areias são dificilmente obtidas em materiais sintéticos ou em outra matéria prima mineral, sendo praticamente insubstituíveis em algumas aplicações industriais.

Para se atingir especificações que atendam estes mercados, muitas vezes são necessários tecnologias e equipamentos sofisticados para seu tratamento. Pelo fato de serem abundantes muitas vezes estes recursos minerais estão próximos aos centros consumidores; fator que pode viabilizar economicamente, ou afetar diretamente no custo no produto final, principalmente por terem menores custos de frete.

Outra vantagem dos depósitos de areia é que se podem se apresentar na forma friável, dispensando a necessidade do uso de perfuração e explosivos na operação de lavra, bem como operações de britagem e moagem no beneficiamento, resultando em redução de custos de produção. Areia é um bem mineral de baixo valor unitário e apresenta características físicas e químicas indispensáveis a determinadas aplicações, que são insubstituíveis por outras matérias primas minerais de forma econômica.

Areias para fins industriais são produzidas basicamente a partir de sedimentos arenosos, arenitos e quartzitos (neste caso, pode haver necessidade de detonação com explosivos e britagem).

Os processos de lavra e beneficiamento a serem usados dependem das características do minério e da aplicação industrial a que se destinará a areia produzida. Evidentemente, utilizações com especificações mais rígidas requerem não só minério de melhor qualidade, como tratamento mais eficiente e sofisticado, além de manuseio adequado da areia industrial produzida.

Pode-se resumir algumas das principais características das areias industriais como:

- a) **Distribuição granulométrica:** mesmo sendo definida como um material naturalmente granular entre 0,0625 e 2,0 mm, ainda é possível seu desdobramento industrial em faixas granulométricas adequadas a cada uso;
- b) **Forma dos grãos:** geologicamente os grãos são classificados quanto à forma, entre angulares e arredondados, e também entre irregulares a esféricos, dependendo do desgaste ocorrido durante sua liberação da rocha fonte e o transporte até sua deposição final. Dentro de uma mesma jazida, as formas dos grãos podem variar, em função dos seus diferentes tamanhos;
- c) **Porosidade e permeabilidade:** sendo a areia um material granular, é poroso e permeável, propriedades estas relacionadas com tamanhos e formas dos grãos, distribuição granulométrica e compactação;
- d) **Composição química:** esta característica influi diretamente na cor da areia. Pode variar de local para local, em função dos minerais contaminantes. É esperado que a areia seja predominantemente silicosa,

consequentemente constituía de quartzo. Existem depósitos minerais em que a composição seja de sílica praticamente pura.

4.2.3.1 Principais propriedades das areias

- a) **Inércia química:** as areias, por serem constituídas predominantemente por grãos de quartzo, possibilitam a inércia química, pois o quartzo é pouco susceptível a reações químicas;
- b) **Fonte de quartzo:** característica óbvia, sendo o mineral quartzo, sílica pura;
- c) **Refratariedade:** devido ao alto ponto de fusão do quartzo ($\sim 1.700\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- d) **Resistência mecânica:** característica intrínseca do quartzo, sendo as areias amplamente utilizadas para confecção de moldes para fundição de peças, assim como propante na perfuração de poços de petróleo e gás, por exemplo.

Ao se pensar em usos industriais de areia, seus principais usos estão relacionados às seguintes indústrias.

4.2.3.2 Indústria de fabricação de vidros

A areia industrial é o insumo mais importante na indústria vidreira, cuja finalidade é fornecer SiO_2 para formação da rede de estrutura do vidro. O seu baixo custo e relativa abundância são fatores fundamentais uma vez que na composição dos vidros a areia participa com aproximadamente 70%.

Com relação ao formato dos grãos da areia, aquelas que possuem grãos com formas angulares favorecem o processo de produção do vidro, pois a fusão se inicia nas pontas e arestas dos grãos (NAVA, 1997). A areia para a indústria de vidro deve apresentar um teor elevado de quartzo, baixos teores de ferro e de material refratário. Como a areia é o principal insumo na manufatura do vidro, a localização da jazida de areia, na maioria dos casos, influencia na escolha do local da fábrica (SHREVE; BRINK JUNIOR, 1977).

A especificação química geral pode ser resumida na Tabela 3.

Tabela 3 – Especificações químicas gerais das areias vidreiras para os diferentes tipos de vidro¹⁸

Tipo de Vidro	A	B	C	D	E
Parâmetro	Óptico	Vidros de Mesa	Embalagem Incolor	Embalagem Colorida	Plano
SiO ₂ (%)	≥ 99,5	≥ 99,5	≥ 99,4	≥ 99,4	≥ 99,4
Al ₂ O ₃ (%)	≤ 0,29	≤ 0,20	≤ 0,30	≤ 0,40	≤ 0,40
Fe ₂ O ₃ (%)	≤ 0,015	≤ 0,025	≤ 0,06	≤ 0,16	≤ 0,040
TiO ₂ (%)	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,02	-	≤ 0,04
perda ao fogo (%)	≤ 0,20	≤ 0,20	≤ 0,20	≤ 0,40	≤ 0,20

Especificação granulométrica das areias para fabricação de vidros tipos A, B, C:

- a) 100% < 0,60 mm (30 # ASTM);
- b) 80 a 90% > 0,150 mm (100 # ASTM);
- c) mínimo 90% > 0,075 mm (200 # ASTM).

Especificação granulométrica das areias para fabricação de vidros tipo E:

- a) 100% < 1,0 mm (18 # ASTM).

O grupo Saint-Gobain tem a seguinte especificação para areias utilizadas na fabricação de vidros:

Especificação química:

- a) SiO₂ ≥ 99,6%;
- b) Fe₂O₃ ≤ 0,025% ou Fe₂O₃ ≤ 0,015%, dependendo do tipo de vidro a ser fabricado.

¹⁸ Anotações pessoais de Noedir Nava, informação fornecida em 30 set. 2013.

Especificação granulométrica (% retida acumulada):

- a) $0\% \geq 0,71 \text{ mm}$ (25 # ASTM);
- b) $0\% \geq 0,60 \text{ mm}$ (30 # ASTM), ou máximo $0,5\% \geq 0,60 \text{ mm}$ (30 # ASTM) dependendo do tipo de vidro a ser fabricado;
- c) mínimo $99\% \geq 0,075 \text{ mm}$ (200 # ASTM).

O vidro: O início da utilização do vidro pelo homem ainda é controversa e remonta a milhares de anos. A palavra vidro vem do latim *vitrum*. Segundo Kennedy (1997), o homem começou a utilizar o vidro através de fragmentos de obsidiana, um vidro natural formado pelas erupções vulcânicas (Figura 86). A obsidiana se forma a partir do magma que, ao se resfriar rapidamente, não forma cristais, solidificando como um material amorfo.

Figura 86 – Peças encontradas em sítios arqueológicos, produzidas com obsidianas

Fonte: Akerman (2012).

Smith (1964) associa a descoberta do vidro a uma lenda. Conta-se que há cerca de 4.500 anos, mercadores fenícios precisavam reparar o navio em que viajavam e aportaram na praia de uma ilha do Mar Mediterrâneo (Figura 87). Ao cair da noite, acenderam uma fogueira na areia da praia e, para proteger o fogo do vento e apoiar os potes para cozinhar os alimentos, teriam utilizado blocos de carbonato de sódio (trona), Na_2CO_3 . Na manhã seguinte, os mercadores observaram pedaços irregulares brilhantes sobre a areia, junto à fogueira. Esses teriam sido os primeiros fragmentos de vidro obtidos (acidentalmente) pelo homem. A lenda tem fundamento, pois o calor do fogo teria favorecido a mistura de trona com a areia da praia, rica em

SiO_2 , juntamente com o óxido de cálcio das conchas. Os óxidos de cálcio e de sódio teriam se misturado aos grãos de areia e formado os pedaços de vidro enquanto a fogueira esfriava.

Figura 87 – Referência à lenda em que mercadores fenícios descobriram acidentalmente o vidro

Fonte: Akerman (2012).

É possível que o vidro tenha realmente sido descoberto acidentalmente, mas é mais provável que essa descoberta esteja relacionada com a queima de peças cerâmicas, ou com a fusão das primeiras peças metálicas pouco antes da Idade do Bronze (aproximadamente 3000 - 1200 a.C.) (SMITH, 1964).

Philippsen (2007) acredita que o vidro começou a ser comercialmente produzido por volta de 3000 a.C. no Egito. Nessa época, os egípcios produziam jarros de vidro com formato relativamente irregular, opacos e de coloração escura. Segundo Smith (1964), o método de confecção contava com uma haste de madeira, em que se fixava uma mistura de areia com argila, definindo o formato da parte interna do jarro. Sobre essa haste, que era rotacionada horizontalmente, o vidro pastoso era enrolado (Figura 88).

Figura 88 – Vidro pastoso líquido sendo enrolado sobre a argila para preparar um jarro

Fonte: Smith (1964).

Depois de resfriada a peça, a haste de madeira e a argila eram cuidadosamente removidas e o jarro estava pronto para ser utilizado para decoração ou para armazenar líquidos.

A Figura 89 apresenta peças de vidro produzidas no Egito, provavelmente por volta de 1500 a.C. Nota-se que as peças eram coloridas e não transparentes (AKERMAN 2012).

Figura 89 – Peças de vidro produzidas no Egito – 1.500 a.C.

Fonte: Akerman (2012).

Bunde, Funke e Ingram (1998) relatam um registro de receita de fabricação de vidro, pertencente à antiga biblioteca do Rei assírio Assurbanipal (690-627 a.C.), grafada em escrita cuneiforme que dizia: *“tome 60 partes de areia, 180 partes de cinzas de algas marinhas e cinco partes de cal. Assim você obterá o vidro”*.

Nos séculos seguintes a indústria vidreira não teve um desenvolvimento muito expressivo até por volta de 30 a.C., quando foi inventada a vara de sopro, conhecida como “cana” (Figura 90). Este dispositivo consiste em um tubo de ferro oco, com 1,5

a 2,0 metros de comprimento, que permite soprar o vidro ainda quente. A descoberta teria supostamente ocorrido na Fenícia (atual Síria e Líbano). Era possível então usar ferramentas para moldar as peças confeccionadas. Com isso intensificou-se a fabricação e o comércio de artefatos de vidro. A técnica de assoprar o vidro chegou a Roma onde, no ano 100 d.C., os arquitetos romanos começaram a usar o vidro relativamente plano para confeccionar janelas que, apesar de opacas, deixavam passar luz suficiente para iluminar os ambientes. Essa vara de sopro ainda é utilizada nos dias atuais, principalmente para fazer peças decorativas e com formas complexas (SMITH, 1964).

Figura 90 – Vidro sendo soprado

Fonte: Akerman (2012).

De acordo com Doremus (1973), foi na ilha de Murano, nas proximidades de Veneza (Itália), que houve um acentuado crescimento do número de indústrias de vidro, em virtude de aquela cidade ter se tornado, a partir do século X, um importante centro comercial no Mar Mediterrâneo. Os artesãos que eram levados para trabalhar nas indústrias de vidro de Murano permaneciam confinados na ilha até o fim de suas vidas, de modo a assegurar que os segredos da indústria vidreira não fossem divulgados a outros países, mantendo Veneza com o monopólio vidreiro. Os vidros de Murano ficaram famosos, principalmente pelo elevado grau de

transparência dos vidros incolores, e das colorações magníficas de muitas peças confeccionadas.

Definição de vidro: Segundo Elliott (1990), um material é classificado como um sólido amorfo quando os átomos que o compõe não possuem organização de longo alcance em sua rede, ou seja, quando o material não apresenta periodicidade estrutural.

Navarro (1991, p. 53) e Yamane e Asahara (2000, p. 1) transcreveram a definição de vidro de 1945 feita pela Associação Americana para Testes de Materiais (*American Society for Testing Materials* - ASTM) como sendo um “produto inorgânico, produzido através de fusão, que foi resfriado a uma condição rígida sem sofrer cristalização”. Portanto, os materiais vítreos não podem ser classificados na categoria de sólido cristalino, pois lhes falta um arranjo atômico ordenado e periódico como a apresentada pelos cristais. Adicionalmente, apesar de apresentar semelhanças com o arranjo atômico de um líquido, sua condição não os permite ser classificados como tal. Em 1976, a *U.S. National Research Council* propôs uma definição mais geral: “vidro é um material amorfo no espalhamento de raios-X e que exibe a transição vítrea”. A transição vítrea foi definida como “um fenômeno no qual uma fase amorfa sólida muda subitamente suas propriedades termodinâmicas”. “Neste caso, a capacidade térmica e o coeficiente de expansão passam por grandes variações quando o material passa pela região da sua temperatura de transição vítrea” (RAWSON, 1980, p. 1).

Callister Junior (2002) descreve o vidro como um material cerâmico amorfo, que é amplamente usado em indústrias como, por exemplo, de embalagens, recipientes, janelas, lentes, prisma, fibra de vidro, fibra ótica, etc. Existem vários tipos de vidros dos quais os mais comumente utilizados são vidros de silicatos, que se consistem predominante de óxidos silício e de outros óxidos em menor quantidade, tais como: CaO , Na_2O , K_2O e Al_2O_3 , os quais influenciam em suas propriedades.

Shelby (2005) faz uma definição mais ampla de vidro, como sendo um sólido amorfo com ausência completa de ordem a longo alcance e periodicidade, exibindo uma região de transição vítrea. Qualquer material inorgânico, orgânico ou metal, formado por qualquer técnica, que exibe o fenômeno de transição vítrea é o vidro.

A aparência do vidro é essencialmente a de um sólido. Densidade, propriedades mecânicas e térmicas são similares às de suas contrapartes cristalinas. Entretanto, diferentemente dos cristais, os vidros não possuem um nítido ou bem definido ponto de fusão. Não clivam em direções preferenciais. Na ausência de estrias os vidros são praticamente isotrópicos; esta propriedade é que os tornam mais assemelhados aos líquidos, pois sua disposição molecular demonstra a desordem típica de um líquido na ordem de longo alcance (VARSHNEYA, 1994).

O vidro é um material extremamente importante para a humanidade. Por ter propriedades como a transparência, a resistência e a durabilidade torna-se adequado à produção de uma vasta gama de produtos que requerem transmissão de luz como principal função. A propriedade de ser inerte faz do vidro um ótimo material para armazenamento de alimentos sólidos e líquidos. Também é amplamente utilizado em laboratórios, em função de sua alta durabilidade química. Os produtos e componentes de vidro são fundamentais para os segmentos como da construção civil, automotivos, embalagens, iluminação, produtos ópticos, oftalmológicos, eletrônicos e nas telecomunicações (MCLELLAN; SHAND, 1984).

A temperatura de transição vítrea: Segundo Schmitt (2012), a temperatura de transição vítrea caracteriza materiais vítreos, sendo definida como a passagem do estado viscoso para o estado rígido. No estado rígido o material necessita de muita energia para iniciar o movimento apresentando comportamento de sólido. Esta temperatura de transição não é definida somente em termos do sistema que se está analisando, ela também depende do processamento térmico no qual este sistema foi obtido (FOLGUERAS, 2001).

A dificuldade para se enquadrar adequadamente os corpos vítreos dentro de um dos três estados de agregação da matéria, deu lugar a se pensar em integrá-los em um quarto estado de agregação: o estado vítreo. Essa sugestão, entretanto, nunca chegou a ter uma aceitação generalizada (AKERMAN, 2000).

4.2.3.2.1 Tipos de vidros

Navarro (1991) afirma que em função da aplicação, processo de produção e disponibilidade de matérias primas, há infinitas formulações e classificações de vidros. Pode-se dividir, no entanto, os vidros em famílias:

- a) Sílica vítrea;
- b) Silicatos alcalinos;
- c) Vidros soda-cálcicos;
- d) Vidros ao chumbo;
- e) Vidros borossilicatos;
- f) Vidros alumino-borossilicato.

Sílica vítrea: Este tipo de vidro é obtido aquecendo-se areia de sílica ou cristais de quartzo até uma temperatura acima do ponto de fusão da sílica, 1.750 °C. Devido a sua natureza de rede tridimensional, o processo de fusão é muito lento. O vidro resultante é muito viscoso para que uma possível bolha formada no processo de fusão se liberte naturalmente no banho (MCLELLAN; SHAND, 1984; NAVARRO, 1991).

A sílica vítrea tem coeficiente de expansão térmico muito baixo, sendo ideal para aplicação em janelas de veículos espaciais, espelhos astronômicos, bem como em outras aplicações onde é exigida baixa expansão térmica com o objetivo de se obter resistência a choque térmico ou estabilidade dimensional (NAVARRO, 1991).

Silicatos alcalinos: A fim de reduzir a viscosidade do vidro fundido de sílica, é necessário adicionar um fluxo ou modificador de rede. Os óxidos alcalinos são excelentes fluxos. Como eles são modificadores de rede, “amolecem” a estrutura do vidro pela geração de oxigênio não pontantes, quer dizer, o oxigênio é ligado somente a um átomo de silício (AKERMAN, 2000).

Os óxidos alcalinos são normalmente incorporados nas composições dos vidros como carbonatos. Acima de 550 °C, os carbonatos reagem com sílica formando um líquido silicoso e, se a proporção de carbono alcalino e sílica forem adequadas, formará o vidro por meio do resfriamento; ainda que essas reações aconteçam abaixo do ponto de fusão da sílica (MCLELLAN; SHAND, 1984).

A adição de materiais alcalinos diminui a resistência química do vidro. Com altas concentrações de álcalis, o vidro será solúvel em água, formando a base da indústria de silicatos solúveis utilizados em adesivos, produtos de limpeza e películas protetoras (AKERMAN, 2000).

Vidros soda-cálcicos: Para reduzir a solubilidade dos vidros de silicatos alcalinos mantendo-se a facilidade de fusão, são incluídos na sua composição, fluxos estabilizantes no lugar de fluxos alcalinos. O óxido estabilizante mais utilizado é o de cálcio, muitas vezes junto com óxido de magnésio. Esses vidros são comumente chamados de soda-cálcicos e pertencem à família de vidros mais antiga e largamente utilizada. Vidros soda-cálcicos foram utilizados pelos antigos egípcios e ainda hoje são usados na fabricação da maior parte de garrafas, frascos, potes, janelas, bulbos e tubos de lâmpadas (AKERMAN, 2000).

As composições da maioria dos vidros soda-cálcicos estão dentro de uma faixa estreita de composição. Eles contêm, normalmente, entre 8 e 12% em peso de óxido de cálcio e de 12 a 17% de óxido alcalino (principalmente óxido de sódio). Muito cálcio faz com que o vidro tenha tendência a de vitrificar (cristalizar) durante o processo de produção. Muito pouco cálcio ou alto teor em alcalinos resulta em um vidro com baixa estabilidade química. Usualmente, uma pequena quantidade de alumina (0,6 a 2,5%) é incluída na formulação para incrementar a durabilidade química (AKERMAN, 2000; MCLELLAN; SHAND, 1984).

Vidros ao chumbo: O óxido de chumbo é normalmente um modificador de rede, mas em algumas composições pode atuar como um formador de rede. Vidros alcalinos ao chumbo têm uma longa faixa de trabalho (pequena alteração de viscosidade com diminuição de temperatura) e, dessa maneira têm sido usados por séculos para produção de artigos finos de mesa e peças de arte (AKERMAN, 2000).

O chumbo também confere ao vidro um maior índice de refração, incrementando seu brilho. Principais aplicações: copos, taças, cálices, ornamentos e peças artesanais (AKERMAN, 2000; ALVES; GIMEZES; MAZALI, 2001).

Popularmente, copos e taças de vidro ao chumbo são erroneamente chamados de “cristais”, devido ao seu brilho mais intenso.

Vidros borossilicatos: Os vidros borossilicatos apresentam alta resistência ao choque térmico e por isso são empregados em produtos de mesa que podem ser levados ao forno. É o caso do Pyrex e do Marinex. Devido à menor quantidade de óxidos modificadores, além da resistência aos choques térmicos, vidros borossilicatos são também muito resistentes ao ataque químico e por isso são utilizados em vários equipamentos de laboratório (AKERMAN, 2000; MCLELLAN; SHAND, 1984).

Vidros alumino-borossilicatos: Quando se adiciona alumina (óxido de alumínio) em uma formulação de vidro silicato alcalino, o vidro se torna mais viscoso em temperaturas elevadas. Em vidros ao silicato, a alumina é uma formadora de rede (embora sozinha não forme vidro em condições normais) e assume uma coordenação tetraédrica similar à sílica. Sendo o alumínio trivalente, em contraste com o silício que é tetravalente, a coordenação tetraédrica da alumina diminui o número de oxigênios não pontantes, o que aumenta a coesão da estrutura do vidro. Como consequência, vidros alumino-silicatos comerciais podem ser aquecidos a temperaturas superiores sem deformação, comparando-se a vidros soda-cálcicos ou à maioria dos borossilicatos. Vidros alumino-silicatos são utilizados em tubos de combustão, fibras de reforço, vidros com alta resistência química e vitro-cerâmicos (AKERMAN, 2000).

4.2.3.2.2 Fibra de vidro

A areia industrial também é utilizada para fabricação de fibra de vidro e tem nessa aplicação a mesma função que na fabricação de vidros. Devido aos requisitos granulométricos, é sempre produzida a partir da moagem das areias vidreiras.

Especificação química típica:

- a) $\text{SiO}_2 \geq 99,3\%$;
- b) $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,05\%$;
- c) $\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 0,10\%$;
- d) $\text{TiO}_2 \leq 0,05\%$;

- e) $K_2O \leq 0,05\%$;
- f) $CaO \leq 0,05\%$;
- g) $Na_2O \leq 0,05\%$;
- h) perda ao fogo $\leq 0,63\%$;
- i) umidade $\leq 0,09\%$.

Especificação granulométrica típica (retido na malha):

- a) 0,425 mm (40 # ASTM) - 0 “zero” grão em 10 kg de amostra;
- b) 0,250 mm (60 # ASTM) - 0 “zero” grão em 10 kg de amostra;
- c) 0,212 mm (70 # ASTM) - 0 “zero” grão em 10 kg de amostra;
- d) 0,150 mm (100 # ASTM) $\leq 0,03\%$;
- e) 0,075 mm (200 # ASTM) $\leq 0,36\%$;
- f) 0,045 mm (325 # ASTM) - de 2,0% a 8,0%.

4.2.3.2.3 Propriedades dos vidros

As propriedades dos vidros, assim como todos os outros materiais, dependem de suas características estruturais. A variação das propriedades com a composição pode ser avaliada, com certa aproximação, em função da concentração dos componentes, mediante expressões lineares nas quais intervêm fatores de proporcionalidade obtidos experimentalmente para cada óxido e para cada propriedade. A velocidade com o qual é efetuado o resfriamento do vidro dentro do intervalo de transformação determina o seu grau de relação estrutural, que influencia em suas características finais (NAVARRO, 1991).

Viscosidade: As características da viscosidade para os vidros são importantes para estudar o estado vítreo.

A viscosidade do vidro depende da temperatura e da composição do vidro. A rápida mudança de viscosidade com temperatura usada na fabricação do vidro requer o uso de diferentes métodos de medição. A temperatura líquida do vidro depende só da composição. A viscosidade controla a influência de todos os estágios

na fabricação do vidro, e o valor da temperatura líquida é um dos fatores que determina o processo a ser utilizado (BABCOCK, 1977).

Dilatação térmica: O coeficiente de dilatação é uma das características de maior importância tecnológica dos vidros, o qual influencia, por exemplo, a resistência ao choque térmico, limitando sua utilização em certas aplicações (fabricação de termômetros, sistemas ópticos) (BABCOCK, 1977; MCLELLAN; SHAND, 1984; NAVARRO, 1991).

O comportamento dilatométrico dos vidros depende fundamentalmente de sua composição e de sua história térmica (NAVARRO, 1991).

O coeficiente de expansão térmica para o vidro cerâmico é bem diferente do vidro original. Isto depende do tipo da fase cristalina e da substância presente, que pode ser controlada por um programa de tratamento térmico (STRNAD, 1986).

Resistência ao choque térmico: Quanto maior for a dilatação térmica, menor será a resistência do vidro a mudanças bruscas de temperatura. Quanto mais fina for a peça, ainda que produzida com o mesmo vidro, menores serão as diferenças de temperatura entre os pontos frios e quentes, e, portanto maior a resistência ao choque térmico (NAVARRO, 1991).

A quebra sempre se dá na região mais fria da peça, onde ocorre a tração, e comumente o risco maior de quebra é quando o vidro está quente e sofre um esfriamento rápido (NAVARRO, 1991).

Quando a superfície do vidro é rapidamente aquecida, a tensão inicial desenvolvida é de compressão tal que, a fratura é relativamente pequena. Mas quando o vidro é rapidamente resfriado, a tensão passa a ser tração de forma que a fratura aumente (MCLELLAN; SHAND, 1984).

Propriedades mecânicas: O comportamento do vidro nos distintos esforços mecânicos aos quais pode ser submetido durante o uso, constitui em geral uma importante limitação para algumas de suas aplicações (NAVARRO, 1991).

Propriedades ópticas: O vidro por não apresentar estrutura cristalina, e sim randômica em todas as direções, tem a característica de ser isotrópico, isto é, suas propriedades independem da posição na qual são analisadas. Portanto, quando uma

massa de vidro é homogênea e não sujeita às tensões, ela é opticamente isotrópica (NAVARRO, 1991).

A maioria dos vidros comerciais usados no cotidiano é produzida com três ingredientes principais, areia, cal e barrilha, que respondem por 90% das matérias primas que alimenta os fornos de fabricação de vidro. O vidro normalmente contém 70 - 74% de SiO_2 , sendo esta sílica provida principalmente pela areia industrial e, de modo crescente, por vidro reciclado. Os outros componentes, como CaO , MgO (na forma de dolomita) e Al_2O_3 (como minerais feldspáticos), são adicionados para conferir estabilidade e durabilidade ao vidro (SHREVE; BRINK JUNIOR, 1977).

Os mais importantes produtos de vidro, em volume de produção, são os vidros planos, os vidros brancos de embalagem e os vidros coloridos de embalagem. Outras aplicações são na fabricação de bulbos de lâmpadas e tubos de luz fluorescente; telas de televisão e de computadores; fibra de vidro, entre muitas outras (BRITISH GEOLOGICAL SURVEY, 2013).

Além da rígida especificação granulométrica e química, o mercado de fabricação de vidros demanda produtos com rigorosa restrição com relação a minerais pesados e refratários, como turmalinas, por exemplo.

4.2.3.3 Indústria de fundição

Segundo Nava (1997), o principal constituinte dos moldes para fundição de peças é a areia industrial, que é denominada areia base. O metal ou liga é fundido em moldes nos quais a areia é utilizada. A areia tem a função de resistir às solicitações térmicas, mecânicas e químicas a que estão submetidos os moldes, desde o vazamento do metal fundido até a solidificação das peças produzidas. As areias de fundição são produzidas com granulometrias específicas para confecção de moldes e machos utilizados para produção de peças automotivas, caminhões, ônibus, equipamentos agrícolas, etc. Comercialmente são designadas por módulos de finura e devem possuir, no mínimo, 99% de SiO_2 .

As propriedades físicas e químicas da areia são importantes e dependem de vários fatores, tais como do tipo de metal e de produto a ser fundido e do tipo de aglomerante utilizado (LUZ; LINS, 2008). No passado, eram utilizadas areias contendo argilas, estas em quantidade suficiente para conferir plasticidade e

resistência ao molde, funcionando como ligante. Atualmente, a demanda é por areias sem argilas (lavadas), com alto teor de sílica. Devem também apresentar uma distribuição granulométrica estreita e grãos com alta esfericidade. O agente ligante, uma argila (geralmente bentonita) ou resina, é adicionado e misturado à areia para a fabricação do molde (BRITISH GEOLOGICAL SURVEY, 2013).

Nava (1979) conclui que o termo areia de fundição, ou areia de moldagem, é genérico e indica um material heterogêneo, constituído de um elemento granular refratário (areia base) e um aglomerante, que pode ser mineral (argila), orgânico (óleos, derivados de cereais, etc.) ou químico (resinas).

As areias de moldagem variam largamente, tanto em sua composição química, quanto no aspecto físico, em função do modo como serão usadas, pois cada tipo de fundição, ou metal a ser fundido, exige areias com características distintas, por exemplo:

- a) Areia para moldes: é utilizada na elaboração dos moldes para metais fundidos. Varia entre material argiloso, areia limpa e cascalho, dependendo do metal a ser vazado, tamanho da peça, tipo de superfície desejada e ponto do molde onde será aplicada a areia. Normalmente deve ter alto teor de SiO_2 , para apresentar refratariedade suficiente, boa resistência mecânica e menos de 1% de Fe_2O_3 ;
- b) Areia de separação: é uma areia não coesiva, com a qual se cobre as faces de contato de um molde para evitar a aderência e auxiliar a separação do molde da forma. Usam-se, normalmente, areias finas e isentas de argila;
- c) Areia de faceamento: trata-se da areia de moldagem usada para fabricar a face do molde que, por sua vez, é diferente do material que compõe o corpo do molde. Naturalmente usada em fundição pesada, em grandes moldes para melhorar o acabamento da peça;
- d) Areia de acabamento: são areias de moldagem para alumínio, latão e bronze, que, exigem superfícies lisas e regulares, necessitando, assim, de areias finas que conseqüentemente apresentam baixa permeabilidade;
- e) Areia de macho: areias nas quais a permeabilidade é a principal qualidade requerida. Exige também boa colapsibilidade após o vazamento do metal (facilidade de fragmentação);

- f) *Steel Sand* é a areia de moldagem usada na fundição de aços, requerendo alto grau de refratariedade, o que implica numa areia quartzosa limpa, com teor de SiO_2 da ordem de 99,5%. Uma areia com estas características apresenta baixa coesão, tornando-se necessária a adição de ligantes adequados. A granulometria é uma função do tamanho do molde e da peça a ser fundida.

Segundo Nava (1979), uma areia de moldagem deve preencher os seguintes requisitos básicos para suprir as necessidades dos fundidores:

- a) Resistência ou coesão: é a capacidade dos grãos em manterem juntos uma areia de moldagem. Carregada em um molde, a areia deve ter coesão suficientemente forte para que, quando retirada do modelo, os grãos permaneçam ligados entre si, preservando a forma desejada e resistindo à pressão do metal vazado dentro do molde sem haver corrosão (arraste de areia). Muitas areias para fabricação de aço ou macho são deficientes do ponto de vista de resistência, sendo necessária a adição de um material ligante adequado (argila, melão, resinas, etc.). As areias de moldagem adquirem coesão em função do material ligante que contêm;
- b) Refratariedade: quando a areia está sujeita a certo grau de calor, deve apresentar infusibilidade. A areia de moldagem deve ser suficientemente refratária a ponto de não sinterizar ou fundir com o consequente fechamento dos poros, impedindo o escape de gases e o amolecimento dos moldes quando o metal é vazado. As areias para fundição de aço são sujeitas a temperaturas muito altas e, consequentemente, requerem materiais muito silicosos;
- c) Granulometria: refere-se à distribuição percentual dos diferentes tamanhos dos grãos. É um requisito importante, pois influi diretamente na coesão e permeabilidade, bem como nas características da peça fundida;
- d) Permeabilidade: é a propriedade que uma areia possui de permitir que um gás ou líquido flua através dela. Isso depende do espaço aberto entre os grãos. Ela não deve ser confundida com a porosidade, que é o volume de espaços da areia, pois permeabilidade diz respeito a poros e espaços intercomunicantes. Essa propriedade diminui pelo socamento do molde,

sendo que as areias com grãos de tamanhos variados dão um empacotamento mais fechado, diminuindo a permeabilidade, enquanto que aquelas com grãos mais uniformes têm maior porosidade. Em compensação, quando submetidas a altas temperaturas, estas areias proporcionam maior expansão ao molde (dilatação);

- e) Durabilidade: é uma propriedade importante de ponto de vista econômico e até mesmo ambiental, pois algumas areias podem ser usadas repetidas vezes sem tratamentos e outras só podem ser reaproveitadas com pequenas adições de areia nova;
- f) Moldabilidade: a areia de moldagem deve poder ser socada com facilidade, tornando-se bem compacta e assumindo a forma do modelo. Esta característica afeta a economia de trabalho na confecção do molde e depende da escoabilidade da areia.

Quando se atribui à areia os defeitos em peças fundidas, normalmente deve-se referir à areia de moldagem, e não à areia base propriamente dita. Contudo, esta última é o constituinte fundamental da areia de moldagem e, por esse motivo, deve ser dotada de especificações bem determinadas, pois transmite diretamente seu comportamento e características à areia de moldagem. Por outro lado, de nada adiantará usar a areia base corretamente, se os aglomerantes, sistemas ou técnicas não forem bem controlados (NAVA, 1979).

4.2.3.3.1 Características da areia base

De acordo com Nava (1979), sendo a areia base o componente majoritário na areia de moldagem, ela influi diretamente no seu comportamento e características. Torna-se, portanto, necessário o perfeito conhecimento de suas características para que se consiga a composição ideal de uma areia de moldagem.

Devem ser observadas as seguintes características:

- a) Granulometria;
- b) Teor de argila (segundo a American Foundry Society – AFS);
- c) “Pureza”;

- d) Forma e integridade dos grãos;
- e) Textura superficial;
- f) Refratariedade;
- g) Permeabilidade e expansibilidade.

Na granulometria, três aspectos importantes devem ser observados, sendo o primeiro deles, o tamanho dos grãos, que é expresso de acordo com o módulo de finura¹⁹ determinado pela *American Foundry Society* (AFS), que é calculado pela soma do produto da porcentagem retida simples de cada malha por um fator, baseado na série de peneiras Tyler, dividido por 100:

- a) Areia grossa: entre 30 e 50;
- b) Areia média: entre 50 e 70;
- c) Areia fina: entre 70 e 100;
- d) Areia muito fina: entre 100 e 150;
- e) Areia finíssima: acima de 150.

Esse fator é muito importante, pois, quanto mais fina for a areia base empregada, melhor será o acabamento da peça. Por outro lado, quanto mais grossa, maior a permeabilidade do molde. Portanto, deve-se escolher uma areia apropriada para cada serviço. Quando se têm várias alternativas proporcionando a permeabilidade necessária, é preciso levar em conta o bom acabamento da peça. Nesse caso, a opção deveria ser para aquela areia com módulo de finura mais elevado, apesar disto significar um maior consumo de aglomerantes, devido a sua maior área superficial específica. Muitas vezes, o acabamento é um fator de extrema importância; então, para compensar a baixa permeabilidade do molde usam-se “canais de subida”, que aumentam muito a ventilação da cavidade do molde.

O segundo fator a ser observado é a distribuição granulométrica, que deve apresentar-se de uma forma tal que confira à areia alta permeabilidade e baixa expansão. Denomina-se “concentração granulométrica” o valor máximo porcentual retido em três peneiras consecutivas da série padrão.

¹⁹ A metodologia para cálculo do módulo de finura AFS está detalhada na tabela 51, Volume 2 desta Tese.

Areias de alta concentração granulométrica apresentam alta permeabilidade, devido ao grande número de espaços intergranulares, geralmente vazios. Contudo, nessas areias, há uma tendência de expansão acentuada. Já as areias de concentração granulométrica menor apresentarão menos espaços entre grãos, pois os grãos menores se localizarão nos interstícios daqueles de maior dimensão e, dessa forma, a areia terá uma menor permeabilidade. Além disso, essas areias possibilitam uma melhor “amarração” ao molde.

É importante frisar que existe correlação entre o fenômeno de expansão da areia e a distribuição granulométrica; a forma dos grãos e a natureza de suas superfícies. Observa-se que a areia de concentração granulométrica superior a 70% apresenta tendência à expansão.

O terceiro fator importante, e que deve ser observado na análise granulométrica de uma areia, é o percentual de finos que ela contém. Ele corresponde ao valor retido nas duas últimas peneiras e mais o que passa pela última peneira da série padrão; ou seja, é o material de tamanho inferior a 0,106 mm (140 # ASTM). Há vantagens e inconvenientes na presença desses finos, pois eles formam uma camada em torno dos grãos maiores, separando-os e reduzindo a expansão, mas, ao mesmo tempo, diminuindo a permeabilidade do molde. Há valores ótimos em relação ao teor de finos, sendo que a prática aconselha, para areias grossas e médias, um percentual de finos entre 6 a 10%.

O teor de argila é outra característica a ser observada na areia base, adotado pela *American Foundry Society* (AFS), o qual é definido pela quantidade de partículas que, quando dispersas num meio aquoso, sedimentam com uma velocidade inferior a 25,4 mm por minuto. Pela Lei de Stokes, nessa essa velocidade de sedimentação, as partículas teriam dimensões inferiores a 0,02 mm.

O termo argila adotado neste ensaio corresponde unicamente a um conceito granulométrico, pois não corresponde à exata definição dos argilo-minerais (silicatos hidratados de alumínio, com coloração variada em função dos óxidos presentes e formados por cristais finos) caracterizados por propriedades aglomerantes típicas. A argila AFS detecta, além dos argilo-minerais com características aglomerantes, os materiais finos ou *silts*, sem propriedades aglomerantes. A proporção destes finos inertes tende a aumentar com o uso repetido da mesma areia, devido à queima de argila aglomerante e que, acima de uma temperatura crítica, perde suas

características. Também é aumentada pela adição de finos inertes, provenientes da abrasão e fraturamento dos grãos de areia base.

A “pureza”, de uma areia base é outra característica de interesse, pois representa uma função dos minerais contaminantes presentes e também da cobertura dos grãos por películas de substâncias aderentes.

Os minerais contaminantes são os outros grãos que não os de quartzo, tornando-se nocivos quando constituídos de minerais de baixo ponto de fusão e que, portanto, se comportam com fundentes sob altas temperaturas de vazamento, soldando os grãos de quartzo entre si. São eles: turmalina, ilmenita, hematita, calcita e feldspato. Há minerais nocivos que não prejudicam a refratariedade, mas minerais como os do grupo das micas, dificultam a coesão entre os grãos. Na prática adota-se um limite de 3% de impurezas.

Com relação a películas aderentes, a mais comum é a formada por óxido de ferro, que não é nocivo até um teor máximo de 2% de Fe_2O_3 . Quando a origem da areia é de praia, as impregnações de sal normalmente não são prejudiciais. O caso contrário ocorre com a matéria orgânica, que confere cor cinza escura à areia, diminuindo a resistência da areia de moldagem, já que tende a se queimar sob altas temperaturas. O grau de pureza pode ser detectado através do exame da areia com uma lupa, devendo ser auxiliado por análise química.

No que diz respeito ao seu formato, os grãos podem ser classificados segundo dois critérios: arredondamento ou esfericidade.

O arredondamento consiste na medida do desgaste das arestas dos grãos, abrandando-as. Já a esfericidade está relacionada à forma arredondada dos mesmos.

De uma maneira genérica, os grãos de uma areia base são classificados em quatro grupos:

- a) Grãos angulares: possuem arestas vivas ou muito pouco desgastadas. Estes grãos proporcionam melhor amarração ao molde; porém, como o socamento, as arestas tendem a se desgastar ou quebrar, produzindo finos e, com as partículas menores têm menor refratariedade, abaixam o ponto de sinterização da areia. Estes finos podem funcionar como “almofadas” de separação entre os grãos maiores e, como consequência, haverá uma diminuição no efeito de expansão, mas diminuindo a

permeabilidade do molde. Os grãos angulares, por terem área superficial específica relativamente maior, necessitam de maiores quantidades de aglomerantes. Devido ao desgaste e quebra das arestas, para que essas areias possam ser aproveitadas várias vezes, necessitam de etapa de beneficiamento adicional para eliminação do excesso de finos que se formam, o que implica em aumento de custos e diminuição da durabilidade;

- b) Grãos redondos: suas arestas e faces são bastante desgastadas pelos processos geológicos, recebendo formas próximas à de esferas. Pelo seu formato, estes grãos apresentam maior rolamento e acomodação, facilitando a socagem. Dão maior colapsibilidade aos machos e, por terem área superficial específica menor, requerem menos aglomerantes. Por apresentarem um desgaste insignificante durante a socagem, pode-se dizer que sua permeabilidade praticamente não será afetada, inclusive apresentando maior durabilidade. Como os grãos redondos têm maior tendência à expansão, por sua facilidade de compactação; também os moldes podem apresentar menor amarração, com uma resistência mecânica conseqüentemente menor. Como superfícies arredondadas têm menor facilidade de serem “presos” pelo aglomerante, estes grãos podem ser mais facilmente arrastados pelo metal fundido;
- c) Grãos subangulares: são os grãos que apresentam arestas já com certo desgaste, mas preservando a face e grande parte de sua forma original. Apresentam características intermediárias entre os tipos angular e redondo. Têm sido muito recomendados por não apresentarem as desvantagens anteriores com intensidades tão agravantes;
- d) Grãos agrupados: são agregados formados por grãos menores e que, particularmente, podem apresentar as formas já citadas. Normalmente são agregados por Fe_2O_3 , mas podem apresentar também argila, calcário, etc., que possivelmente funcionam como fundentes. Estes agregados não têm resistência mecânica ao socamento, apresentando grande debilidade e dificultando o controle granulométrico. O esboroamento desses agregados implica num “afinamento” da areia com conseqüente diminuição da permeabilidade; é, portanto, desaconselhável o uso desse tipo de areia.

A integridade dos grãos é outro aspecto a ser observado na areia base. Grãos de areia com trincas ou plano de fratura proeminente diminuem a durabilidade da areia, além de dificultar o controle granulométrico.

Com relação à textura superficial, os grãos de superfície áspera e irregular são muito mais vantajosos que seus opostos de superfície lisa e polida, pois possuem maior aderência ao aglomerante, conferindo maior resistência ao molde.

Como a areia base é fundamentalmente o elemento refratário do molde, a refratariedade é muito importante, pois outras propriedades deficientes de um molde podem ser corrigidas de diversas maneiras, fato difícil de conseguir para areia pouco refratárias. O ponto em que a areia sinteriza depende da temperatura de fusão e das dimensões da peça. Quando a refratariedade é insuficiente, a parte da areia é sinterizada produzindo, na peça fundida, superfícies defeituosas.

Deve-se, ainda, ressaltar que é importante para o molde a boa permeabilidade da areia base seca e isenta de aglomerante. Essa propriedade é influenciada pela forma dos grãos e distribuição granulométrica.

A importância desse fator se deve à necessidade de um molde em expulsar os vapores que se formam pelo aquecimento da areia úmida, no vazamento. Esse vapor deve encontrar facilidade para sair através do molde e não pelo canal de alimentação e, se possível, sem que seja preciso puncioná-lo, fazendo canais de subida. Além da permeabilidade base, a umidade, o teor de aglomerante, a poeira recirculante, etc. influenciam na permeabilidade do molde, bem como o socamento.

4.2.3.3.2 Características das areias de fundição

Se a qualidade dos moldes depende das características das areias base, estas dependem das características das areias de fundição. Dentre as principais características das areias de fundição, pode-se destacar:

- a) Resistência: a qual depende principalmente do elemento aglomerante utilizado para manter as partículas do material refratário coesas;
- b) Permeabilidade: à passagem dos gases;
- c) Refratariedade: a areia moldada deve ser capaz de resistir às altas temperaturas de fusão dos metais sem que os grãos se fundam ou que o

elemento aglomerante perca sua capacidade de manter as partículas coesas;

- d) Umidade: o qual afeta a permeabilidade (maior umidade, menor permeabilidade), a resistência (maior umidade, menor resistência) e a formação de gases (maior umidade, maior geração de gases);
- e) Fluidez: a qual afeta a moldabilidade, ou seja, a capacidade de fluência para o preenchimento de cavidades, reentrância e detalhes.

4.2.3.3.3 O Processo de fundição

Segundo Ferreira e Daitx (2000) e Silva (2009), fundição é um processo de fabricação de peças metálicas que consiste essencialmente em preencher com metal líquido a cavidade de um molde com formato e medidas correspondentes aos da peça a ser fabricada.

O processo de fundição é conhecido pelo homem desde aproximadamente 3000 a.C. Cobre e bronze foram os primeiros metais a serem fundidos. O desenvolvimento de fornos de fundição com temperaturas de trabalho mais altas e utensílios capazes de conter o ferro fundido permitiu que as primeiras fundições de ferro fundido se desenvolvessem a partir de 1340 d.C. (SILVA, 2009).

O objetivo da fundição é dar a forma adequada ao metal, vertendo-o na cavidade de um recipiente denominado molde, o qual tem a forma desejada, isto é, a forma da peça que se pretende fabricar. Por vezes é necessário tratar o metal para se alterar a sua composição química. Deste modo, num passo único, formas simples ou complexas podem ser feitas de qualquer metal que possa ser fundido. As peças fundidas podem variar desde frações de centímetros e baixo peso até vários metros e várias toneladas (FERREIRA, 2012).

Ferreira (2012) cita as principais vantagens do processo de fundição:

- a) As peças fundidas podem apresentar formas externas e internas desde as mais simples até as muito complicadas, com formatos impossíveis de serem obtidos por outros processos;
- b) As peças fundidas podem apresentar dimensões limitadas pelas restrições das instalações onde são produzidas. Isso quer dizer que é possível

produzir peças de poucos gramas de peso e com espessura de parede de apenas alguns milímetros ou pesando muitas toneladas;

- c) A fundição permite um alto grau de automatização e, com isso a produção rápida e em série de grandes quantidades de peças;
- d) As peças fundidas podem ser produzidas dentro de padrões variados de acabamentos (mais liso ou mais áspero) e tolerância dimensional (entre $\pm 0,2$ mm e ± 6 mm) em função do processo de fundição usado. Neste caso, há uma grande economia em operações de usinagem;
- e) A peça fundida possibilita grande economia de peso, porque permite a obtenção de paredes com espessuras quase ilimitadas.

Ferreira (2012) e Silva (2009) resumem o processo de fundição às seguintes etapas:

- a) **Confecção do modelo:** com o formato da peça a ser fundida, constrói-se o molde (Figura 91). O modelo deve ser ligeiramente maior que a peça original, pois, se deve levar em conta a contração durante solidificação.

Figura 91 – Confecção do modelo

Fonte: Ferreira (2012).

- b) **Confecção do molde:** o molde é o dispositivo no qual o metal fundido é colocado para que se obtenha a peça desejada. Ele é feito de material refratário composto de areia e aglomerante. Esse material é moldado sobre o modelo que, depois de retirado, deixa uma cavidade com o formato da peça a ser fundida (Figura 92).

Figura 92 – Confeção do molde

Fonte: Ferreira (2012).

- c) **Confeção dos machos:** dispositivos com a função de formar vazios, furos e reentrâncias na peça. São colocados nos moldes antes de seu fechamento para receber o metal líquido.
- d) **Fusão do metal:** a fusão ocorre para vazamento nos moldes (Figura 93).

Figura 93 – Fusão do metal

Fonte: Ferreira (2012).

- e) **Vazamento:** é o processo de enchimento do molde com o metal líquido (Figura 94).

Figura 94 – Processo de vazamento

Fonte: Ferreira (2012).

- f) **Desmoldagem:** Após determinado período de tempo em que a peça se solidifica dentro do molde, e que depende do tipo de peça, do tipo de molde e do metal (ou liga metálica), ela é retirada do molde (desmoldagem) manualmente ou por processos mecânicos (Figura 95).

Figura 95 – Processo de desmoldagem

Fonte: Ferreira (2012).

- g) **Rebarbação:** consiste na retirada dos canais de alimentação, massalotes e rebarbas que se formam durante a fundição. Ela é realizada quando a peça atinge temperaturas próximas a do ambiente.

- h) **Limpeza:** a limpeza é necessária porque a peça apresenta uma série de incrustações de areia usada na confecção do molde. Geralmente ela é feita por meio de jatos abrasivos.

4.2.3.3.4 Resinas utilizadas no processo de fundição

Resinas sintéticas para aglomeração de areia: Segundo Ferreira (2012), resina sintética é um termo genérico de uma classe de substâncias de composição química complexa, alto peso molecular e ponto de fusão indeterminado. Estes compostos apresentam propriedade de polimerização ou cura, isto é, fusão de várias moléculas para formar longas cadeias moleculares. Ao se polimerizarem, as resinas sintéticas endurecem, formando blocos de material sólido e quimicamente inerte. A reação de polimerização é normalmente iniciada por certos reagentes químicos, como ácidos fortes ou ésteres, ou por condições físicas, como sabor ou radiação.

As resinas sintéticas vêm sendo utilizadas comercialmente nos mais diversos produtos desde o início do século, quando foi introduzido o material conhecido como baquelite. Entretanto, foi somente durante a II Guerra Mundial que a indústria, ao pesquisar alternativas para as matérias-primas tradicionais, descobriu o grande potencial de aplicação das resinas sintéticas.

Resinas sintéticas: Ferreira (2012) classifica as resinas sintéticas em dois grandes grupos, de acordo com a sua propriedade final:

- a) **Resinas termoplásticas:** são resinas que têm a propriedade de amolecer sob a ação do calor e de enrijecer quando resfriadas, todas as vezes que for aplicado o calor necessário;
- b) **Resinas termoestáveis (termofixas):** são compostos que ao se solidificarem (curarem) tornam-se produtos insolúveis, infusíveis, rígidos e estáveis. Isso significa que a cura não é apenas a evaporação do solvente, ou seja, a secagem propriamente dita, mas sim o desencadeamento de uma ou mais reações químicas complexas, como condensação, reticulação, polimerização, etc. Para que a cura se processe é imprescindível que exista no sistema um conjunto de condições que

possibilitem estas reações, como calor e pH adequados. As características de insolubilidade e infusibilidade são inerentes às resinas sintéticas formadas por ligações cruzadas (reticulação). A estrutura química da resina é controlada de forma que sua polimerização final ocorra apenas na utilização da resina na manufatura do produto final. Este é o principal tipo de resina empregado na indústria de fundição.

Segundo Ferreira (2012), as resinas sintéticas mais utilizadas nos processos de fundição são:

Resinas fenólicas: também chamadas resinas fenol-formol, são resinas sintéticas termofixas produzidas pela reação de fenol e formol.

As primeiras informações sobre as resinas fenólicas surgiram em 1872, na Alemanha, quando A. Von Bayer descobriu que o fenol reagindo com o formol originava um produto resinoso. Em 1910, as resinas fenólicas foram, pela primeira vez, aplicadas industrialmente na produção de vernizes de isolamento elétrico. A partir de 1920 iniciou-se o desenvolvimento de materiais moldados para a indústria automobilística e, sobretudo, para a indústria de equipamentos elétricos.

Resinas ureia-formol: também chamadas resinas ureicas, são resinas termofixas produzidas pela reação de formol com ureia. Apresentam alta qualidade, ótima versatilidade e baixo custo. Podem ser produzidas com diversas composições moleculares, puras ou modificadas por outros compostos, resultando em resinas especiais. As resinas ureicas contêm nitrogênio, originário da própria ureia, que é uma amina. Podem ser formuladas com diversas temperaturas de cura, desde a temperatura ambiente até 200 °C.

Resinas furânicas: são resinas complexas, com três componentes ativos: ureia-formol/álcool furfurílico ou fenol-formol/álcool furfurílico. São resinas líquidas e termofixas, catalisadas por sistemas ácidos. Resinas furânicas especiais do tipo novolaca são utilizados em outras áreas técnicas. Em fundição, utilizam-se os seguintes tipos básicos de resinas furânicas:

- a) **Resina ureica-furânica:** apresenta teor de álcool furfurílico entre 30 e 80% e diferentes teores de nitrogênio e água. Tem alta resistência a frio e é adequada para o uso com alumínio e ferros fundidos de baixa liga. Em alguns casos, os altos teores de nitrogênio podem interferir na qualidade final do fundido, causando porosidades;
- b) **Resina fenólica-furânica:** apresenta teor de álcool entre 30 e 70%, com um desempenho ligeiramente inferior à resina ureica-furânica em termos de desenvolvimento de resistência a frio. Entretanto, devido à ausência de nitrogênio, é mais indicada para o uso com aço, ferro fundido nodular e ferro fundido de alta resistência;
- c) **Resina ureica-fenólica-furânica:** apresenta teor de álcool furfurílico entre 40 e 85%, com baixos teores de nitrogênio, apesar de manter um bom desenvolvimento de resistência a frio. É adequada para ferro fundido de alta resistência, ferro fundido nodular e aço.

4.2.3.3.5 *Fundição em areia verde*

Dentre os processos de fundição é o mais simples e o de menor custo, sendo também o mais utilizado. As matérias primas para este processo são basicamente uma mistura de aproximadamente 75% de areia silicosa, 20% de argila e 5% de água. A mistura recebe o nome de “areia verde” porque mantém sua umidade original, não sendo necessária sua secagem em estufas. Os componentes da areia de fundição são misturados secos com o auxílio de misturadores, seguindo-se da adição, aos poucos, de água até a completa homogeneização da mistura.

A moldagem é realizada manualmente, com soquetes, ou mecanicamente, com auxílio de máquinas de compressão, impacto, vibração ou projeção centrífuga. A areia utilizada pode ser reaproveitada, chegando-se a obter índices de recuperação da ordem de 98%. Os moldes em areia verde se prestam à fundição de metais ferrosos e não ferrosos com rapidez e economia, adequando-se à produção em série (FERREIRA, 2012).

4.2.3.3.6 Shell Molding

Shell Molding é um processo de produção de areia recoberta com resinas para a confecção de moldes e machos utilizados na fabricação de peças seriadas de alta precisão, em que a qualidade dimensional é fator crítico.

Segundo Berndt (1989), o Processo Shell foi inventado na Alemanha em 1943 por Johannes Corning, em cuja patente original (DRP 832.937) encontrava-se a seguinte descrição: “processo para a obtenção de machos ocos para fundição e moldes de fundição em casca”.

a) Princípio do processo

Sobre uma placa de modelo aquecida, após aspersão de um moldante, é derramada ou soprada uma mistura de areia e resina sintética. A resina é curada a morno, formando imediatamente uma casca em volta do modelo. Após um tempo pré-fixado (determinando a espessura da parede da casca), a areia não curada é eliminada, de modo que permanece uma casca de areia ligada à resina sintética. Após o período de cura, em que geralmente a parte externa da casca também está quente, pode-se então, extraí-la do modelo através de pinos extratores. A operação pode ser reiniciada após limpeza do modelo e pulverização do separador.

A confecção do macho em casca é feita de maneira semelhante: derrama-se ou sopra-se a areia coberta com resina na caixa de macho aquecida. Após um período pré-determinado, retira-se o excesso de areia, cura-se o macho pelo lado externo ou por ambos os lados e extrai-se o mesmo da caixa de macho.

O molde é confeccionado em metades de casca, sendo os machos assentados antes do seu acoplamento, sendo mantidas acopladas por colagem. Os moldes prontos para fundir podem ser vazados na posição horizontal ou vertical, assim como podem ser colocados em recipientes e preenchidos com granalha de aço. Após o vazamento, o molde se desintegra pela queima da resina (BERNDT, 1989).

Pode-se resumir o processo nas seguintes etapas:

- a) Areia recoberta com resina é colocada sobre ou dentro da placa ou caixa de machos aquecida;
- b) Formação da casca durante o tempo de cura;

- c) Retirada do material ainda não curado;
- d) Cura da casca por um ou ambos os lados;
- e) Extração das partes do modelo ou da caixa de machos;
- f) Retirada da casca;
- g) Colagem das duas metades da casca num dispositivo de colagem;
- h) Limpeza do modelo e/ou da caixa de machos e aplicação do separador.

A Figura 96 apresenta um modelo simples de uma máquina simples de moldagem em casca (de acordo com a patente original) e etapas do processamento *Shell Molding*.

Figura 96 – Modelo de uma máquina simples de moldagem Shell e etapas do processamento

Fonte: Berndt (1989).

4.2.3.4 Indústria de cerâmicas e refratários

Emprega-se a areia de quartzo na composição de massas cerâmicas, como fonte de SiO_2 (NAVA, 1986). Na indústria cerâmica, a areia de quartzo moída é um componente essencial na formulação da massa e do esmalte de vários tipos cerâmicos, tais como: louça de mesa, louça sanitária, cerâmica de piso e de revestimento, refratários, cerâmica elétrica, vidrados/fritas e cadinhos de porcelana. O elevado uso da sílica na indústria cerâmica é atribuído à sua alta dureza, alta temperatura de fusão, refratariedade, e baixo custo. A areia de quartzo, em alguns casos pode ser substituída por quartzito. Como carga, sua função é fornecer SiO_2 , reduzir a plasticidade, a deformação e o tempo de secagem, bem como aumentar a porosidade e resistência mecânica durante a queima (FERREIRA; DAITX, 2000).

Especificação química geral para areias de fundição:

- a) SiO_2 : 97,5% a 99,8%;
- b) Al_2O_3 : 0,035% a 0,7%;
- c) Fe_2O_3 : 0,02% a 0,8%.

Para peças a serem decoradas e/ou esmaltadas, a composição química da areia pode ser menos rígida.

Especificações granulométricas para areia de fundição:

- a) Dependendo do uso, a areia deve possuir tamanhos de grãos entre 0,60 mm e 0,106 mm (30 e 140 # ASTM), ou ser moída abaixo de 0,075 mm (200 # ASTM).

4.2.3.5 Fritas cerâmicas

Segundo Eppler e Eppler (2000), as fritas cerâmicas constituem-se atualmente como as principais matérias-primas dos esmaltes utilizados no setor de revestimentos cerâmicos. São materiais de natureza predominantemente vítrea preparados por fusão e resfriamento brusco de misturas de minerais que aportam

uma grande diversidade de óxidos à composição do vidro formado (MELCHIADES et al., 2009).

Santos et al. (2010) definem as fritas cerâmicas como materiais de natureza vítrea, preparadas por fusão em temperaturas elevadas ($\sim 1.500\text{ }^{\circ}\text{C}$), a partir de uma mistura de matérias-primas minerais. Os vidrados preparados exclusivamente a partir de fritas são utilizados principalmente em peças cerâmicas nas quais a componente estética é mais importante que a componente técnica, como no caso de azulejos, objetos decorativos e em restaurações odontológicas. Para um efeito decorativo mais eficiente, é necessário que o revestimento cerâmico seja estável o suficiente para não alterar significativamente a cor apresentada pelo pigmento e, dessa forma, possibilitar uma reprodutibilidade da cor obtida.

4.2.3.6 Indústrias petrolíferas (Fraturamento Hidráulico)

Areia Frac ou *Frac Sand* é uma areia industrial bitolada, em suspensão em líquido específico, injetada sob altas pressões através de poços de produção de óleo e/ou gás, nas camadas reservatório. Tem a finalidade de abrir e manter fraturas nessas camadas rochosas, de forma a aumentar a permeabilidade das mesmas após a drenagem do fluido da suspensão injetada e, com isso, aumentar a recuperação de óleo ou gás do poço. Nesse caso, a areia é um agente de sustentação (“*proppant*” em inglês). É também conhecida como areia de fraturamento ou de escoamento, sendo sua função estimular ou forçar uma maior produção de poços de petrolíferos (NAVA, 1986). A Figura 97 ilustra o poder de fraturamento com o uso desta areia.

Figura 97 – Fraturamento de poço petrolífero com utilização de areia Frac

Fonte: OUTOTEC (2008).

Segundo Harben e Kuzvart (1996), um fluido, com areia em suspensão, é bombeado sob alta pressão na formação produtora de petróleo, com a finalidade de aumentar e criar novos poros na rocha (ou são utilizadas promovendo o fraturamento de rochas cujos poros não são suficientemente grandes para que os fluidos fluam para o poço). Em seguida, o fluido é extraído da formação; no entanto a areia permanece, atuando como mantenedor dos poros da rocha abertos.

De acordo com Nava (1986), Areia Frac é, acima de tudo, uma areia de sílica de alta pureza, de alta tenacidade, cujos grãos são capazes de resistir ao esmagamento; devem possuir alto grau de esfericidade e se situar dentro de uma faixa granulométrica específica. É utilizada no processo de fraturamento hidráulico (*fracking*) tanto para a produção de petróleo como de seus derivados, como o gás natural. Podem ser comercializadas cobertas com resinas que aumentam seu poder de compressão, bem como sem cobertura.

Alguns tipos de rocha existentes no subsolo como o xisto, por exemplo, contêm grandes quantidades de petróleo, gás natural e gases liquefeitos que não podem fluir naturalmente devido à falta de permeabilidade da rocha, ou por

deficiência na interligação dos seus poros, ou pelo tamanho relativamente pequeno deles.

O processo de fraturamento hidráulico resolve este problema, através da geração de fraturas na rocha. Isto é feito perfurando-se a rocha, selando a parte do poço em que o petróleo flui e bombeando água sob alta pressão na cavidade formada.

Bombas de alta capacidade são utilizadas para aumentar a pressão da água na parte selada do poço até que esta seja suficientemente alta para ultrapassar o ponto de ruptura das rochas circundantes. Quando este ponto de ruptura é atingido, a água flui rapidamente para as fraturas, inflando-as e as estendendo para regiões mais profundas da rocha. Quantidades muito grandes de grãos de areia são levados para dentro das fraturas por esta súbita onda de água.

As especificações para esse tipo de areia contemplam distribuição granulométrica, morfologia do grão, solubilidade em ácido, limpeza e resistência à compressão (esmagamento).

O American Petroleum Institute - API (1995) estabeleceu uma norma (API RP 56:1995 - *Recommended Practices for Testing Sand Used in Hydraulic Fracturing Operations*) que traz as especificações para areia Frac, apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Especificações para areias de fraturamento (*Frac Sand*) – API RP 56:1995

Fração (µm)	3350/ 1700	2360/ 1180	1700/ 850	1180/ 600	850/ 425	600/ 300	425/ 212	212/ 106	Especificação Granulométrica
Tipo <i>frac sand</i>	(b)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	
	6/12	8/16	12/20	16/30	20/40	30/50	40/70	70/140	
	4	6	8	12	16	20	30	50	máx. 0,1%
	6	8	12	16	20	30	40	70	malha A
Peneiras Especificadas	8	12	16	20	30	40	50	100	
(ASTM E 11-95)	10	14	18	25	35	45	60	120	≥ 90%
	12	16	20	30	40	50	70	140	
	16	20	30	40	50	70	100	200	malha. B
	fundo	fundo	fundo	fundo	fundo	fundo	fundo	fundo	máx. 1,0%
Arredondamento e Esfericidade	≥ 0,6	≥ 0,6	≥ 0,6	≥ 0,6	≥ 0,6	≥ 0,6	≥ 0,6	≥ 0,6	-
Solubilidade (%)	≤ 2,0	≤ 2,0	≤ 2,0	≤ 2,0	≤ 2,0	≤ 2,0	≤ 3,0	≤ 3,0	-
(HCl:HF - 12:3)									
Turbidez máxima (FTU)	250	250	250	250	250	250	250	250	-
Argila (%)	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0	-
Compressão(kPa)* em célula 50,8 mm (2")	13,79	13,79	20,68	20,68	27,58	27,58	34,47	34,47	-
Finos gerados (%)	≤ 20	≤ 18	≤ 16	≤ 14	≤ 14	≤ 10	≤ 8	≤ 6	-

Fonte: American Petroleum Institute - API (1995).

(a) – Tipo principal (b) - Tipo alternativo.

% máxima retida simples na malha A + % máxima retida simples na malha B ≤ 8,9%.

*a norma norte americana se refere à pressão em PSI.

4.2.3.7 Indústrias químicas

A areia é empregada na produção de esmaltes, tintas refratárias para fundição, também como carga mineral de emulsões asfálticas e de explosivos, na fabricação de silicato de sódio e também como agente de moagem de pigmentos na fabricação de tintas (NAVA, 1986). Segundo Harben (1995) e Nava (1997), a areia também pode ser utilizada para na produção de sílica amorfa na fabricação de borrachas e plásticos.

4.2.3.7.1 Indústria de tintas

Os fabricantes de tintas selecionam areias industriais para melhorar a aparência e aumentar a durabilidade das tintas e coberturas industriais e arquiteturas, podendo ser utilizada na forma natural, ou moída. A areia de quartzo de alta pureza contribui para influenciar as propriedades de desempenho como alvura, consistência de cor, adsorção de óleo, etc. Nas tintas denominadas arquiteturas, a areia de quartzo melhora a retenção, a durabilidade e a resistência à sujeira, ao mofo, à fissuração e ao intemperismo. Para o uso em coberturas marinhas e de manutenção, a durabilidade do quartzo confere excelente resistência à abrasão e à corrosão (LUZ; LINS, 2008). Também é utilizada na produção de tintas refratárias usadas em superfícies internas de moldes de fundição.

Especificação química típica:

- a) $\text{SiO}_2 \geq 99,0\%$;
- b) Cor branca;
- c) Deve ser isenta de minerais de baixo ponto de fusão (fundentes).

Especificação granulométrica típica:

- a) $<0,075 \text{ mm}$ (200 # ASTM).

4.2.3.7.2 Indústria de borracha e plástico

A areia industrial (areia de quartzo) é usada na forma moída para produção de sílica amorfa e utilizada como carga mineral, tanto na fabricação de borracha quanto na de plásticos. As principais características que permitem a areia de quartzo ser utilizada nestas indústrias são a alvura, o baixo índice de absorção de óleos e a moabilidade para granulometrias específicas (HARBEN, 1995; NAVA, 1997).

Especificação química típica:

- a) $\text{SiO}_2 \geq 99,0\%$;
- b) Cor branca.

Especificação granulométrica típica:

- a) $100\% < 0,075 \text{ mm}$ (200 # ASTM).

4.2.3.8 Produção de silicato de sódio

A areia industrial é fundida com carbonato de sódio (barrilha) a 1.300°C para fabricação da sílica amorfa. O silicato de sódio (NaSiO_4) é obtido em uma fase intermediária nesse processo. A Tabela 5 apresenta a especificação química de areia para a produção de silicato de sódio, enquanto a Tabela 6 apresenta a especificação granulométrica.

Tabela 5 – Especificação química de areia para produção de silicato de sódio²⁰

Parâmetro	Produto	
	Silicato de Sódio	Sílica Amorfa Precipitada
SiO ₂ (%)	≥ 99,0	≥ 99,0
Al ₂ O ₃ (%)	≤ 0,37	≤ 0,15
Fe ₂ O ₃ (%)	≤ 0,13	≤ 0,02
CaO (%)	≤ 0,04	
MgO (%)	≤ 0,04	
Umidade (%)		≤ 5,0

Tabela 6 – Especificação granulométrica de areia para produção de silicato de sódio²¹

Malha	Produto	
	Silicato de Sódio	Sílica Amorfa Precipitada
0,425 mm (40 # ASTM)	0% retido	13% retido acumulado
0,250 mm (60 # ASTM)	0% retido	20%
0,180 mm (80 # ASTM)		40%
0,150 mm (100 # ASTM)		75%
0,09 mm (170 # ASTM)		98,5%

4.2.3.9 Indústria de cimento

A areia é usada na produção de cimento para suprir eventual deficiência de SiO₂ da argila adicionada ao calcário na composição da mistura crua (antes da sinterização para produção do clínquer).

Especificação química:

- a) Função da composição química do calcário e argila utilizados.

Especificação granulométrica:

- a) Abaixo de 1,0 mm (18 # ASTM).

²⁰ Anotações pessoais de Noedir Nava, fornecida em 30 set. 2013.

²¹ Anotações pessoais de Noedir Nava, fornecida em 30 set. 2013.

4.2.3.10 Abrasivos

As areias são utilizadas em jateamentos para limpezas de superfícies, polimentos de pedras e vidros, e também na composição de peças abrasivas.

A areia Industrial participa como fonte de SiO_2 na fabricação do carvão de silício e as principais especificações típicas são apresentadas a seguir.

Especificação química:

- a) $\text{SiO}_2 \geq 99,4\%$;
- b) $\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 0,2\%$;
- c) $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,1\%$;
- d) perda ao fogo $\leq 0,25\%$.

Especificação granulométrica:

- a) $100\% < 4,75 \text{ mm}$ (4 # ASTM);
- b) 5 a 30% $> 2,36 \text{ mm}$ (8 # ASTM);
- c) 50 a 80% $> 0,85 \text{ mm}$ (20 # ASTM);
- d) máximo 1% $< 0,25 \text{ mm}$ (60 # ASTM).

A areia Industrial moída também é utilizada como agente abrasivo em saponáceos e seguem as especificações típicas a seguir.

Especificação química:

- a) $\text{SiO}_2 \geq 99,1\%$;
- b) $\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 0,54\%$;
- c) $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,09\%$;
- d) $\text{CaO} \leq 0,02\%$;
- e) $\text{MgO} \leq 0,03\%$;
- f) perda ao fogo $\leq 0,20\%$;
- g) cor: branca.

Especificação granulométrica:

- a) $100\% < 0,045 \text{ mm}$ (325 # ASTM).

Outro uso da areia industrial moída é para a geração de sílica amorfa para produção de creme dental. A sílica amorfa é precipitada através do processo de fabricação de silicato de sódio e posteriormente micronizada abaixo de $0,038 \text{ mm}$ (400 # ASTM).

4.2.3.11 Meios filtrantes

A areia industrial é usada em sua forma natural granular como meio filtrante em equipamentos de filtração e purificação de águas, bem como para tratamento de efluentes industriais. É utilizada também na composição de pré-filtros de poços tubulares para captação de água do lençol freático (NAVA, 1986).

Segundo Luz e Lins (2008), a areia para filtração deve ser isenta de impurezas (argilas, pó, materiais micáceos ou orgânicos). Não há restrições ao formato dos grãos, no entanto é desejável que não sejam alongados ou planos. Grãos angulares ou arredondados propiciam porosidade e permeabilidades adequadas aos leitos de filtração. A areia deve apresentar tamanho uniforme e estar distribuída em faixas granulométricas estreitas.

Estas especificações granulométricas devem respeitar os seguintes pontos especificados pelo usuário:

- a) Tamanho efetivo: é obtido por meio da curva granulométrica da areia construída com as porcentagens retidas acumuladas. É o valor em mm correspondente à abertura da malha que deixa passar 10% em peso da amostra representativa da areia (D90);
- b) Coeficiente de uniformidade é a relação entre a abertura da malha em mm, que deixa passar 60% em peso da amostra representativa da areia (D40).

As areias industriais utilizadas como meio filtrante também precisam respeitar as especificações químicas (requisitos de qualidade):

- a) Grãos essencialmente de quartzo ($\text{SiO}_2 \geq 99\%$);
- b) A areia tem que ser totalmente lavada;
- c) Antes, durante e após o fornecimento, a areia deve estar protegida de contaminações;
- d) Solubilidade em ácido (HCl) inferior a 5%;
- e) Massa específica situada entre 2,5 e 2,7 g/cm².

Ao ser utilizada como pré-filtro para poços tubulares, a areia deve ser perfeitamente bitolada e é colocada para preencher o espaço anular formado pela perfuração e o filtro do poço. As características desse material são parecidas com o material filtrante anterior e sua granulometria é determinada em função da distribuição granulométrica da formação perfurada do aquífero, observando que um pré-filtro eficiente determina a retenção de partículas superiores a $\frac{1}{4}$ do diâmetro das partículas mais finas do mesmo, desde que essas partículas representem, no mínimo, 20% do pré-filtro.

Indústria Siderúrgica: a areia é empregada como fonte de SiO_2 na preparação de ferroliga e na fabricação de sínter.

Tração: a areia pode ser necessária em algumas ferrovias para melhorar a tração das rodas do trem com os trilhos, principalmente quando o relevo se torna mais íngreme. A areia é lançada, então, pelo maquinista para aumentar o atrito e assim melhorar a força de tração das locomotivas.

Indústria de Fertilizantes e Defensivos Agrícolas: areias entram nas suas composições como enchimento (veículo).

Meios de troca térmica: a areia atua como meio de transferência de calor entre a fonte de aquecimento e o corpo a ser aquecido nos banhos de areia e também em aparelhos de têmpera em areia fluidizada.

Padrão para medidas físicas: são areias padronizadas química e fisicamente para testes de concretos e em aglomerantes de moldagem para fundição.

Desmonte hidráulico: trata-se de areia utilizada juntamente com jato de água de alta pressão para aumentar a eficiência no desmonte hidráulico de minérios.

Lastro: a areia também pode ser utilizada para equilibrar embarcações.

Agente tixotrópico: a areia de quartzo pode ser utilizada com a função de aumentar a viscosidade de líquidos (BOLEN, 1995).

Indústrias de alta tecnologia: quartzo, amplamente utilizado nas indústrias de alta tecnologia, como a eletrônica, óptica, telecomunicações, informática, painéis solares etc. (NAVA, 1997) e também na fabricação de fibra óptica usada nas comunicações (ZDUNCZYK; LINCKOUS, 1994).

Meios densos: no passado, a areia também foi utilizada em sistemas de beneficiamento (lavagem) de carvão mineral (Cone Chance, em 1917), sendo posteriormente substituída pela magnetita (CAMPOS; LUZ; CARVALHO, 2004).

Segundo Nava (1986), é importante ressaltar que embora uma característica da areia seja favorável a um determinado uso, pode ser desnecessária para outro, podendo até mesmo ser desfavorável. Por exemplo, a refratariedade é uma característica fundamental das areias base utilizadas na indústria de fundição, mas desfavorável na fabricação de vidro, o que obriga tal setor a utilizar-se de fundentes.

Outro exemplo tange à angularidade dos grãos. Na indústria do vidro, quanto mais angulares os grãos melhor, pois a fusão se inicia nas pontas e arestas. Já no caso da indústria de fundição a angularidade propicia a geração de finos pelo desgaste, diminuindo a permeabilidade do molde.

Grãos arredondados ou esféricos são favoráveis à indústria de filtros devido à alta permeabilidade, mas desfavorável à fundição, pois confere menor resistência e possibilita a expansão do molde.

4.2.3.12 Construção civil

Um dos mais importantes usos das areias é na construção civil. De acordo com o Sumário Mineral divulgado pelo Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM (2012), foram produzidas 347 Mt de areia para construção civil no Brasil em 2011.

Na construção civil a areia é utilizada na composição de argamassas e concretos, tendo a função de diminuir a retração dessa composição, aumentar sua resistência mecânica e ao desgaste natural, bem como reduzir o volume de aglomerante (cimento), com consequente redução de custos.

Em função de suas propriedades físicas e químicas, as areias são bastante valorizadas no mercado de construção civil (BRITISH GEOLOGICAL SURVEY, 2013).

Na construção civil, a areia é considerada como um agregado miúdo, que é definido pela norma ABNT NBR 7211:2009 (ABNT, 2009) como sendo um agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 mm, em ensaio realizado de acordo com a norma ABNT NBR NM 248:2003 (ABNT, 2003), com peneiras definidas pela norma ABNT NBR NM ISO 3310-1:2010 (ABNT, 2010).

Whitaker (2001) afirma que o tamanho ideal dos grãos de areia utilizada na construção civil deve estar entre 4,8 mm e 0,075 mm, sendo estes limites fundamentados nas normas técnicas de agregados para construção civil. As classificações das areias podem ser em função do tamanho dos grãos que as compõem, do formato dos grãos, bem como com relação ao seu grau de pureza (composição química). Dependendo da aplicação da areia, estas classificações assumem diferentes graus de importância. Além do tamanho dos grãos, sua distribuição granulométrica é de suma importância para a construção civil. As areias são classificadas de acordo com o Módulo de Finura (MF) calculado em função de sua distribuição granulométrica, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 – Classificação das areias para uso como agregado miúdo na construção civil

Módulo de Finura	Classificação areia	Tamanho em mm
MF > 3,9	Muito grossa	< 4,8 > 2,0 mm
3,3 < MF < 3,9	Grossa	< 2,0 > 1,2 mm
2,4 < MF < 3,3	Média	< 1,2 > 0,42 mm
MF < 2,4	Fina	< 0,42 > 0,15 mm(*)

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2009).

(*) Algumas referências consideram esse limite como 0,075 mm.

Diferentemente do módulo de finura AFS, o módulo de finura para agregados da construção civil é calculado, segundo Oliveira (2007), como a soma das porcentagens retidas acumuladas nas peneiras série normal, dividida por 100 (ABNT, 2003). O módulo de finura é uma grandeza adimensional e deverá ser apresentado com aproximação de 0,01. As peneiras da série normal são: 76 mm; 38 mm; 19 mm; 9,5 mm; 4,8 mm; 2,4 mm; 1,2 mm; 0,600 mm; 0,300 mm; 0,150 mm. A Tabela 8 apresenta um exemplo de cálculo de módulo de finura para areia de construção civil.

Tabela 8 – Exemplo de cálculo granulométrico e módulo de finura para areia de construção civil (ABNT NBR NM 248:2003)

Peneira (mm)	massa (g)	% retida simples	% retida acumulada	cálculo MF
9,5	0	0	0	0
4,8	0	0	0	0
2,4	0	0	0	0
1,2	46	4,6	4,6	4,6
0,600	322	32,2	36,8	36,8
0,300	441	44,1	80,9	80,9
0,150	142	14,2	95,1	95,1
Fundo	49	4,9	100	217,4
Total	1000			MF = 2,17

Fonte: ABNT (2003).

A areia utilizada no exemplo acima é classificada como areia fina MF < 2,4.

Neville (1997 apud WHITAKER, 2001) considera que pelo menos 75% do concreto são representados pelos agregados, sendo estes responsáveis diretos na resistência do concreto. Para Whitaker (2001), a areia é o agregado mais importante nessa composição.

Segundo Petrucci e Paulon (1995 apud WHITAKER, 2001), o **concreto hidráulico** é um material de construção composto por mistura de um aglomerante, materiais inertes e água. Os materiais que constituem o concreto são cimento, agregado miúdo, (principalmente areia), agregado graúdo (rocha britada) e água.

Pasta é o nome que se dá ao cimento misturado na água; quando se adiciona agregado miúdo à pasta, obtém-se a **argamassa**. Portanto, concreto é uma argamassa a qual foi adicionado um agregado miúdo (PETRUCCI; PAULON, 1995 apud WHITAKER, 2001).

Whitaker (2001) ainda ressalta a importância da presença de substâncias indesejáveis nas areias aplicadas na elaboração de concretos, estendendo-se também às argamassas. Os principais contaminantes das areias, neste caso, são: materiais pulverulentos, torrões de argila, materiais carbonosos, impurezas orgânicas, grãos friáveis não resistentes a esforços mecânicos e grãos reativos aos álcalis do cimento.

A norma ABNT NBR 7211:2009 apresenta as especificações para os agregados para concreto (ABNT, 2009). A Tabela 9 limita a questão da distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Tabela 9 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

Fonte: ABNT (2009).

As quantidades máximas de substâncias nocivas também são tratadas na norma ABNT NBR 7211:2009, sendo que os limites máximos apresentados na Tabela 10 não podem ser excedidos (ABNT, 2009).

Tabela 10 – Limites máximos aceitáveis de substâncias nocivas no agregado miúdo com relação à massa do material

Determinação	Método de ensaio		Quantidade máxima relativa à massa do agregado miúdo (%)
Torrões de argila e materiais friáveis	ABNT NBR 7218		3,0
Materiais carbonosos	ASTM C 123	Concreto aparente	0,5
		Concreto não aparente	1,0
Material fino que passa através da peneira 75 µm por lavagem (material pulverulento)	ABNT NBR	Concreto submetido a desgaste superficial	3,0
	NM 46:2003	Concretos protegidos do desgaste superficial	5,0
Impurezas orgânicas	ABNT NBR NM 49:2001		A solução obtida no ensaio deve ser mais clara do que a solução-padrão
	ABNT NBR 7221:2009	Diferença máxima aceitável entre os resultados de resistência à compressão comparativos	10

Fonte: ABNT (2009).

Os limites máximos relativos à expansão dos agregados devido à reação álcali-agregado e teores de cloretos e sulfatos presentes nos agregados também são tratados pela norma ABNT NBR 7211:2009 (ABNT, 2009) e são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Limites máximos para a expansão devida à reação álcali-agregado e teores de cloretos e sulfatos presentes nos agregados

Determinação	Método de ensaio	Limites
Reatividade álcali-agregado	ASTM C 1260	Expansão máxima de 0,10% aos 14 dias de cura agressiva
	ABNT NBR 9773:2010	Expansão máxima de 0,05% aos três meses
		Expansão máxima de 0,10% aos seis meses
Teor de cloretos (Cl ⁻)	ABNT NBR 9917:2009	< 0,2% concreto simples
	ABNT NBR 14832:2002	< 0,1% concreto armado
		<0,01% concreto propendido
Teor de sulfatos solúveis (SO ₄ ²⁻)	ABNT NBR 9917:2009	< 0,1%

Fonte: ABNT (2009).

Pode-se perceber, portanto, a forte relação entre a qualidade dos agregados e a qualidade dos concretos. Sbrighi (2000 apud WHITAKER, 2001) relacionou algumas características dos agregados às propriedades relevantes do concreto e que são apresentadas no Quadro 6.

Quadro 6 – Propriedades do concreto influenciadas pelas características do agregado

Propriedades do concreto	Características relevantes do agregado
Resistência mecânica	Resistência mecânica, textura superficial, limpeza, forma dos grãos, dimensão máxima
Retração	Módulo de elasticidade, forma dos grãos, textura superficial, limpeza, dimensão máxima
Massa unitária	Massa específica, forma dos grãos, granulometria, dimensão máxima
Módulo de elasticidade	Granulometria, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson
Resistência à derrapagem	Tendência ao polimento
Economia	Forma dos grãos, granulometria, dimensão máxima, beneficiamento requerido, disponibilidade

Fonte: Sbrighi (2000 apud WHITAKER, 2001).

Segundo Cavalcanti e Freire (2007) o aproveitamento de areias marinhas para uso na construção civil é realizada em vários países, constituindo-se de uma

ótima oportunidade para o Brasil, que possui uma extensa área costeira, além do fato de que muitas das principais regiões metropolitanas se encontram na zona costeira. Um depósito de granulados marinhos para uso na construção civil precisa passar por ensaios de caracterização, bem como serem definidas as condições de sua utilização. Os documentos básicos a serem utilizados são as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e normas francesas da *Association Française de Normalisation* (AFNOR), quando não houver normatização brasileira. Os principais critérios para a caracterização de um agregado, seja ele continental ou marinho, são a granulometria, propriedades da areia, impurezas orgânicas e reatividade com álcalis do cimento. No caso de areias com presença de conchas, é importante avaliar o teor de CaCO_3 e sais. A utilização de areias marinhas para fabricação de concreto pode apresentar, dois pontos de atenção, altos teores de sais e conchas, bem como altos teores em argilas e micas.

As conchas criam vazios dentro do concreto, aumentando a porosidade e podem ser responsável por um rebaixamento da resistência, principalmente a resistência à compressão. Com relação à resistência à tração, ela pode ser afetada pela existência de uma camada prismática de aragonita que não favorece as ligações pasta-agregado. As conchas intactas podem apresentar restos de uma fina película orgânica que também é nociva às ligações pasta-agregado e podem ainda ocasionar porosidade desfavorável à resistência à corrosão. Devido à atual inexistência de uma norma brasileira que trate da presença de conchas ou carbonato de cálcio nos agregados utilizados na fabricação de concreto, recomenda-se utilizar a norma francesa NF P 18-301 (*Granulats Naturels Pour Bétons Hydrauliques*), que indica que os teores em fragmentos de conchas não devem ultrapassar a 30% (CAVALCATI; FREIRE, 2007).

Com relação aos limites de CaCO_3 (teores obtidos por análise química) para a utilização do agregado para fabricação de concreto, Augris e Cressard (1984 apud CAVALCANTI; FREIRE, 2007) indicam que teores inferiores a 10% são aceitáveis; entre 10% e 20%, aceitação média, devendo ser confirmada por ensaios em corpos de prova; entre 20% e 30%, baixa aceitação, sendo que ensaios em corpo de prova são indispensáveis; e teores acima de 30% são inaceitáveis. Paralelamente, exames das amostras por lupa binocular permitem determinar, por contagem, a porcentagem numérica dos fragmentos de conchas. O peneiramento a 4 ou 5 mm diminui

sensivelmente o teor em conchas, basicamente pela eliminação das conchas inteiras, que são as mais nocivas.

Com relação à presença de sais, Cavalcanti e Freire (2007) salientam que uma vez que a maioria das areias marinhas para uso na construção civil são areias quartzosas ou quartzo-feldspáticas, os sais presentes não são provenientes das mesmas, mas unicamente da água do mar. Depois que a areia está seca, o sal residual está localizado somente no interior dos grãos, podendo eles se cristalizarem tanto na superfície quanto nas irregularidades dos grãos, formando cristais cúbicos facilmente observáveis ao microscópio. Boutmin (1986 apud CAVALCANTI; FREIRE, 2007) define que o teor em sais dos agregados é função do teor em água de retenção das areias e da salinidade das águas residuais. Segundo Boutmin e Ottman (1988 apud CAVALCANTI; FREIRE, 2007) é importante conhecer os diferentes tipos de águas presentes no material, ou seja, água de saturação e água de retenção. A água de saturação é aquela que ocupa a totalidade dos espaços intergranulares. As areias imersas são, a princípio, saturadas e seu teor de água depende da granulometria e da acumulação. A perda de água de uma areia que sofreu descarregamento hidráulico em terra ocorre quando a areia passa de uma condição saturada para uma condição de “escorrida”, pela eliminação da água livre, ou água de percolação, sendo a água restante chamada de água de retenção, a qual permanece fixa, sob a forma de uma película na superfície dos grãos (água pelicular). Por ocasião da secagem da areia, quando a água de retenção é eliminada por evaporação, o teor de sal da areia permanece constante, portanto, o teor de sal residual da areia é função de seu teor de água de retenção. Os mais nocivos sais da água do mar para o concreto são os cloretos (sais contendo Cl^{-1}) e os sulfatos (sais contendo íons SO_4^{-2}).

De acordo com Martins e Nunes (2007), as areias terrígenas marinhas contêm as mesmas propriedades mecânicas, físicas e químicas das areias continentais, podendo ser largamente utilizadas para produção de argamassa, assentamento de tijolos, fabricação de blocos de concreto, vigas, reboca externo e interno, blocos para pavimentos e blocos de alvenaria. Na Inglaterra e País de Gales, cerca de 17% da areia e do cascalho utilizados na construção civil são extraídos do ambiente marinho, correspondendo a mais de 21 milhões de toneladas por ano. Uma das grandes vantagens da utilização de agregados marinhos é a

possibilidade de suprir grandes volumes de material, muito próximos das áreas urbanas, reduzindo de forma drástica os custos e impactos do transporte.

4.2.3.12.1 Pavimentações

Segundo Whitaker (2001), a aplicação de areia na pavimentação de estradas vai desde a construção de bases de agregados graúdos sob capas e revestimentos diversos até a elaboração de pavimentos de concretos de cimento Portland.

De maneira geral, pode-se classificar os tipos de pavimentações em:

- a) Pavimentação betuminosa (asfáltica);
- b) Pavimentação em concreto (mais duráveis e resistente);
- c) Pavimentação em concreto sobre asfalto velho (*white-topping*).

A areia utilizada para a pavimentação betuminosa também é definida como sendo os grãos de tamanho entre 4,8 mm e 0,075 mm. É uma prática comum (e também necessária) a combinação de tipos de areias diferentes (areias de rio, de pedra britada, de cava) para a obtenção da distribuição granulométrica exigida para as misturas betuminosas selecionadas (WHITAKER, 2001).

Considerando areia como agregado miúdo na construção civil, estão disponíveis várias normas brasileiras que regulamentam esta matéria prima. O Quadro 7 lista estas normas atualmente em vigor no Brasil.

Quadro 7 – Normas brasileiras sobre agregados miúdos na construção civil

Norma	Nome
ABNT NBR 7221:2012	Agregado - Índice de desempenho de agregado miúdo contendo impurezas orgânicas - Método de ensaio
ABNT NBR 9775:2011	Agregado miúdo - Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman - Método de ensaio
ABNT NBR 9935:2011	Agregados - Terminologia
ABNT NBR 7218:2010	Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis
ABNT NBR NM 26:2009	Agregados - Amostragem
ABNT NBR NM 52:2009	Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente
ABNT NBR 7389-1:2009	Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto - Parte 1: Agregado miúdo
ABNT NBR 7211:2009	Agregados para concreto – Especificação
ABNT NBR 9917:2009	Agregados para concreto- Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis
ABNT NBR 15577-2:2008	Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 2: Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto
ABNT NBR 6467:2006 Versão Corrigida 2:2009	Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio
ABNT NBR NM 248:2003	Agregados - Determinação da composição granulométrica
ABNT NBR NM 46:2003	Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem
ABNT NBR NM 49:2001 Versão Corrigida:2001	Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas
ABNT NBR NM 27:2001	Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório
ABNT NBR NM 30:2001	Agregado miúdo - Determinação da absorção de água
ABNT NBR NM 2:2000	Cimento, concreto e agregados - Terminologia - Lista de termos
ABNT NBR NM 66:1998	Agregados - Constituintes mineralógicos dos agregados naturais - Terminologia
ABNT NBR 12052:1992	Solo ou agregado miúdo - Determinação do equivalente de areia - Método de ensaio
ABNT NBR 12584:1992	Agregado miúdo - Verificação da adesividade a ligante betuminoso - Método de ensaio

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Com relação ao bem mineral “areia”, as normas brasileiras em vigor atualmente são apresentadas no Quadro 8.

Quadro 8 – Normas brasileiras referentes ao bem mineral areia

Norma	Nome
ABNT NBR 16062:2012	Areia base para fundição - Determinação do teor de sílica pelo método dos ácidos clorídricos e perclóricos — Método de ensaio
ABNT NBR 7214:2012	Areia normal para ensaio de cimento - Especificação
ABNT NBR 9767:2011	Areias para fundição - Determinação do teor de argila total ou argila AFS - Método de ensaio
ABNT NBR 15954:2011	Veículos ferroviários - Requisitos para areia utilizada em areeiros
ABNT NBR 15984:2011	Areia descartada de fundição – Central de processamento, armazenamento e destinação (CPAD)
ABNT NBR 15702:2009	Areia descartada de fundição - Diretrizes para aplicação em asfalto e em aterro sanitário
ABNT NBR 14841:2002	Microrrevestimentos a frio - Determinação de excesso de asfalto e adesão de areia pela máquina LWT
ABNT NBR 13205:1994	Areia aglomerada com resinas de cura a frio para fundição - Determinação da resistência à flexão da mistura-padrão - Método de ensaio
ABNT NBR 12670:1992	Areia coberta e descoberta para fundição - Determinação da resistência à tração à quente - Método de ensaio
ABNT NBR 12671:1992	Areia coberta e descoberta para fundição - Determinação da resistência à tração a frio - Método de ensaio
ABNT NBR 12672:1992	Areia-padrão para ensaios em fundição - Especificação
ABNT NBR 12634:1992 Versão Corrigida:1993	Areia-base para fundição - Determinação da permeabilidade - Método de ensaio
ABNT NBR 12052:1992	Solo ou agregado miúdo - Determinação do equivalente de areia - Método de ensaio
ABNT NBR 12111:1991	Areia-base para fundição - Determinação da demanda de ácido - Método de ensaio
ABNT NBR 12044:1991	Areia coberta e descoberta - Determinação da resistência à flexão a frio - Método de ensaio
ABNT NBR 12046:1991	Areia coberta e descoberta - Determinação de permeabilidade após cura - Método de ensaio
ABNT NBR 11799:1990	Material filtrante - Areia, antracito e pedregulho - Especificação
ABNT NBR 10180:1988	Areia-base de fundição - Determinação do teor de sílica, pelo método da fluorização - Método de ensaio
ABNT NBR 7185:1986 Versão Corrigida:1988	Solo - Determinação da massa específica aparente, "in situ", com emprego do frasco de areia
ABNT NBR 6491:1985	Reconhecimento e amostragem para fins de caracterização de pedregulho e areia
ABNT NBR 7370:1982	Tubos de PVC rígido envolvidos em areia - Determinação da deformação diametral, pela ação de cargas externas
ABNT NBR 6613:1981	Tubos de poliéster armados com fios de vidro e enchimento de areia siliciosa, com junta elástica tipo ponta e bolsa - Ensaio de pressão hidrostática interna do tubo, estanqueidade e deflexão da junta
ABNT NBR 16072:2012	Argamassa impermeável
ABNT NBR 12110:1991	Materiais granulares para fundição - Determinação da distribuição granulométrica - Método de ensaio

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

4.2.3.13 Esporte

A areia é também largamente utilizada em vários tipos de esportes, servindo basicamente para:

- a) Composição de quadras de diversas modalidades esportivas;
- b) Construção de campos de futebol, bem como de futebol *society* (gramados sintéticos);
- c) Construção e conformação de campos de golfe (*green sand*);
- d) Composição de terrenos em hípicas e haras.

4.2.4 Panorama brasileiro de areia para construção civil

O Código de Mineração brasileiro de 27 de fevereiro de 1967 em seu artigo 7º e 8º, respectivamente, classificou e especificou as jazidas em oito classes de substâncias minerais. Assim, o DNPM entende que as areias para uso imediato na construção civil são provenientes de jazidas pertencentes a uma classe de substância (Classe II) e os minerais industriais (inclusive areias) não incluídos nas classes precedentes, são provenientes de jazidas pertencentes à Classe VII (BRASIL, 1967). A fim de clarear o tema, evitando possível discussão jurídica, o panorama brasileiro para areais industriais foi tratado nesta Tese em separado ao panorama brasileiro das areias para uso em construção civil. Não existe na literatura um texto consolidado sobre o panorama brasileiro das areias para uso na construção civil. Sendo este mercado muito importante para a economia brasileira, o autor decidiu escrever esta seção, sendo necessária uma extensa pesquisa nos trabalhos realizados por diversas entidades.

O mercado de areia como agregado para construção civil muitas vezes passa pela informalidade, causando dificuldades em se obter dados estatísticos confiáveis e precisos. Diante desta dificuldade, esta seção foi concebida tomando-se sete fontes de dados diferentes.

A Fonte 1 foi baseada nas informações do Relatório Técnico 01, emitido pela empresa Inventta Consultoria em dezembro de 2012 para compor a publicação: Análise da Cadeia Produtiva de Agregados Minerais para Obras de Construção Civil

e Infraestrutura, publicada pela a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial – ABDI (2012).

Tomando como base o cálculo de produção de agregados da construção civil do DNPM, pôde-se estabelecer uma projeção da produção de areia em três cenários do Produto Interno Bruto (PIB), conforme apresentada na Tabela 12.

Tabela 12 – Projeção do consumo de areia como agregado na construção civil em três cenários de PIB

Ano	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Quantidade em milhões de toneladas										
Cenário frágil PIB 4% / ano	322,6	335,5	348,9	362,9	377,4	392,5	408,2	424,5	441,5	459,2
Cenário mais provável PIB 6% / ano	341,6	362,1	383,8	406,8	431,2	457,1	484,5	513,6	544,3	577,1
Cenário otimista PIB 8% / ano	361,3	390,2	421,4	455,1	491,5	530,9	573,3	619,2	668,7	722,2

Fonte: Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial - ABDI (2012).

A Tabela 13 apresenta o consumo de agregados (areia e brita) por regiões do Brasil, nos anos de 2010 e 2011.

Tabela 13 – Consumo de agregados (areia e brita) por região

Região	Consumo de agregados (t)	
	2010	2011
Norte	43.175.411	45.999.319
Nordeste	128.122.364	135.519.961
Centro-Oeste	55.832.105	58.509.721
Sudeste	303.345.237	324.042.493
Sul	101.265.270	109.670.369
Total	631.740.387	673.741.863

Fonte: ABDI (2012).

A Tabela 14 apresenta a participação dos agregados para construção nos diversos segmentos consumidores e a Tabela 15 apresenta a destinação da areia no seguimento de construção civil, no ano de 2000.

Tabela 14 – Participação dos agregados pelos segmentos consumidores

Segmento consumidor	Areia (%)	Brita (%)
Argamassa	35	-
Concreteiras	20	32
Construtoras	15	24
Indústrias de pré-fabricados	10	14
Revendedores / Lojas	10	10
Pavimentadoras / Usinas asfalto	5	9
Órgãos públicos	3	7
Outros	2	4

Fonte: ABDI (2012).

Tabela 15 – Destinação da areia no segmento de construção civil (ano 2000)

Aplicação	(%)
Massas em geral	50
Concreto dosado em central	25
Concreto não usinado	25

Fonte: ABDI (2012).

A Fonte 2 é baseada nas informações disponibilizadas pela Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil (Anepac) através da publicação do Ibram: Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira, 7ª Edição, de 2012 (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM, 2012). A Tabela 16 apresenta a evolução da demanda no consumo de areia para a construção civil e projeções até 2022.

Tabela 16 – Evolução da demanda de areia e projeções até 2022

Ano	Areia (10⁶ t)	Brita (10⁶ t)
2002	165	108
2013	301	208
2014	313	216
2015	327	254
2016	342	268
2017	357	280
2018	372	293
2019	390	306
2020	410	321
2021	421	327
2022	459	356

Fonte: Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM (2012).

A Fonte 3 se baseou no Anuário Mineral Brasileiro - Parte III (Estatísticas por Substância) publicado pelo DNPM em 2010 (DNPM, 2010). A Tabela 17 apresenta os quantitativos de produção e os valores em reais correspondentes a essas vendas e a Tabela 18 mostra as principais empresas produtoras de areia para construção, ambas tendo como base o ano de 2009.

Tabela 17 – Quantidades e valores das vendas de areia para construção (ano de 2009)

Substância	Bruta		Beneficiada		Valor total (R\$)
	Quantidade (t)	Valor (R\$)	Quantidade (t)	Valor (R\$)	
Areia	255.807.957	2.960.589.715	9.576.649	136.665.653	3.097.255.368

Fonte: DNPM (2010).

Tabela 18 – Principais empresas produtoras de areia para construção (ano de 2009)

Empresas	UF⁽¹⁾	Participação⁽²⁾(%)
Itaquareia Indústria Extrativa de Minérios Ltda.	SP	6,24
Pirâmide Extração e Comércio de Areia Ltda.	SP	2,01
Somar – Sociedade Mineradora Ltda.	RS	1,97
Mineração de Areia Paraíba do Sul Ltda.	SP	1,57
Aro Mineração Ltda.	RS	1,46
Sociedade dos Mineradores de Areia do Rio Jacuí Ltda. – SMARJA	RS	1,41
Roseira Extração e Comércio de Areia e Pedra Ltda.	SP	1,25
Lemos Construções Transportes de Areia e Cascalho Ltda.	GO	1,24
Paraíso Extração e comércio de Areia Ltda.	SP	1,23
G.R. Extração de Areia e Transportes Rodoviários Ltda.	GO, PR, SC	0,95

Fonte: DNPM (2010).

(1) Unidade da federação onde ocorreu a comercialização.

(2) Participação percentual da empresa no valor da comercialização da substância.

A Tabela 19 apresenta o mercado consumidor de areia para construção (produtos brutos e beneficiados), por participação percentual de cada estado, enquanto a Tabela 20 apresenta os setores de consumo de areia, por usos, tanto para os produtos brutos quanto para os beneficiados.

Tabela 19 – Mercado consumidor de areia para construção (distribuição regional)

Estado	Produtos Brutos	Produtos Beneficiados
	Consumo (%)	
São Paulo	23,01	70,83
Rio Grande do Sul	19,33	-
Rio de Janeiro	13,19	0,74
Santa Catarina	6,61	1,19
Minas Gerais	4,84	6,31
Paraná	3,68	3,50
Distrito Federal	2,68	1,66
Ceará	1,77	-
Pernambuco	1,48	-
Espírito Santo	1,33	-
Goiás	1,21	0,99
Mato Grosso	1,08	0,05
Bahia	1,06	-
Mato Grosso do Sul	1,02	3,55
Maranhão	0,97	-
Rondônia	0,57	-
Pará	0,49	0,05
Amazonas	0,40	-
Paraíba	0,38	-
Sergipe	0,33	-
Piauí	0,31	-
Amapá	0,25	-
Rio Grande do Norte	0,23	-
Acre	0,19	0,20
Alagoas	0,15	-
Tocantins	0,14	0,24
Roraima	0,03	-
Mercado externo	0,25	-
Não informado	13,02	10,69

Fonte: DNPM (2010).

Tabela 20 – Consumo de areia (bruta e beneficiada) por setor (usos)

Setores de consumo/ uso	Produtos	Produtos
	Brutos	Beneficiados
	Consumo (%)	
Construção civil	68,96	96,54
Construção/ manutenção de estradas	4,51	1,12
Aterro	3,88	-
Comércio de materiais de construção	2,89	0,42
Artefatos de cimento	1,42	1,21
Cerâmica vermelha	0,18	-
Pavimentação asfáltica	0,15	-
Siderurgia	0,11	-
Argamassa para construção	0,1	-
Artefatos de concreto	0,08	-
Extração e beneficiamento de minerais	0,06	-
Cimento	0,06	-
Concreto para construção	0,02	-
Tratamento de água/ esgoto	-	0,03
Não informado	17,58	0,68

Fonte: DNPM (2010).

A Fonte 4 é o Sumário Mineral Brasileiro (33ª edição) - Substância: Areia para Construção - publicado pelo DNPM em 2013 (DNPM, 2013). Os valores de produção de areia fornecidos pelos Relatórios Anuais de Lavra (RALs) são subestimados e isso se deve principalmente a problemas de informalidade por parte das pequenas unidades produtoras. A estimacão da produção de areia no Brasil é feita de maneira indireta através do consumo de cimento e asfalto. Os dados de produção brasileira de areia nesta publicação foram estimados da mesma forma. A Tabela 21 apresenta a produção mundial desta substância mineral, em 2011 e 2012, comparando os Estados Unidos, Canadá e Brasil.

Tabela 21 – Produção mundial de areia para construção (Estados Unidos, Canadá e Brasil)

Países	2011^(r)	2012^(p)
EUA*	802.000.000 t.	842.000.000 t.
Brasil	346.772.000 t.	368.957.000 t.
Canadá*	222.000.000 t.	225.000.000 t.

Fonte: Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM (2013).

(r) – revisado; (p) – dado preliminar; (*) – inclui cascalho.

A Fonte 5 se baseia no Relatório Técnico 31 – Perfil de Areia para Construção Civil, escrito por Quaresma (2009) através da J. Mendo Consultoria. A Tabela 22 apresenta o consumo de areia para o setor da construção no Brasil, de 1975 a 2007, tendo como base o consumo de cimento (para a produção de uma tonelada de cimento: $3,5 \text{ m}^3 \text{ areia} \times 1,5 \text{ t/m}^3 = 5,25 \text{ t de areia}$).

Tabela 22 – Consumo de areia no Brasil em milhões de toneladas (1975 – 2007)

Ano	Consumo	Ano	Consumo	Ano	Consumo
1975	98,07	1986	148,21	1997	228,71
1976	111,9	1987	147,83	1998	238,84
1977	122,64	1988	147,84	1999	239,19
1978	134,98	1989	150,5	2000	236,27
1979	145,58	1990	151,36	2001	231,24
1980	158,77	1991	159,67	2002	230,9
1981	153,53	1992	143,41	2003	207,16
1982	150,57	1993	148,3	2004	212,18
1983	122,83	1994	150,65	2005	223,61
1984	113,24	1995	169,66	2006	234,59
1985	120,87	1996	207,8	2007	267,66

Fonte: Quaresma (2009).

A Tabela 23 apresenta a projeção da produção de areia para o setor da construção no Brasil, sendo seu consumo apresentado na Tabela 24. Estas duas tabelas foram calculadas pelo autor com base em anotações pessoais e publicações do DNPM (2012, 2013).

Tabela 23 – Projeção da produção de areia no Brasil (em milhões de toneladas)

Ano	Cenários		
	Frágil	Vigoroso	Inovador
2007	279	279	279
2008	313	313	313
2009	335	335	335
2010	344	348	351
2011	354	362	369
2012	364	377	388
2013	374	392	407
2014	385	363	428
2015	395	408	449
2016	405	426	478
2017	415	445	509
2018	426	465	542
2019	436	486	578
2020	447	508	615
2021	456	533	664
2022	465	560	717
2023	475	588	775
2024	484	617	837
2025	494	648	904
2026	504	681	976
2027	514	714	1.054
2028	524	750	1.138
2029	535	788	1.230
2030	545	827	1.328

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Tabela 24 – Projeção de consumo de areia no Brasil (em milhões de toneladas)

Ano	Cenários		
	Frágil	Vigoroso	Inovador
2007	267,66	267,66	267,66
2008	301,00	301,00	301,00
2009	322,00	322,00	322,00
2010	331,02	334,88	338,1
2011	340,28	348,27	355,00
2012	349,81	362,21	372,75
2013	359,61	376,69	391,79
2014	369,68	391,76	410,96
2015	380,03	407,43	431,51
2016	389,53	425,77	459,56
2017	399,26	444,93	489,43
2018	409,25	464,95	521,24
2019	419,48	485,67	555,12
2020	429,96	507,73	591,21
2021	438,56	533,12	638,50
2022	447,33	559,78	689,58
2023	456,28	587,77	744,75
2024	465,41	617,15	804,33
2025	474,72	648,01	868,67
2026	484,21	680,41	938,17
2027	493,89	714,43	1.013,22
2028	503,77	750,16	1.094,28
2029	513,85	787,66	1.181,82
2030	524,12	827,05	1.276,37

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

A Fonte 6 se trata de um levantamento particular²² encomendado pelo autor. Na Tabela 25, são apresentados os dados de produção entre os anos 2000 e 2013, bem como sua projeção até 2020. Os dados de produção de 2000 a 2011 são números reais.

²² Relatório encomendado a um consultor, especialista no mercado de areia para construção civil, Engenheiro Cláudio Santiago, em 21 de fevereiro de 2014.

Tabela 25 – Produção e projeção de produção de areia no Brasil (2000 - 2020)

Ano	Produção (x10 ⁶)	Modelo para areia (x10 ⁶)*
2000	237,2	243,21
2001	244,4	241,63
2002	240,8	211,66
2003	214,1	218,50
2004	201,0	226,02
2005	238,0	247,32
2006	255,0	276,69
2007	279,0	314,63
2008	314,5	317,17
2009	311,1	366,34
2010	317,8	377,72
2011	372,8	399,42
2012	403,8	407,80
2013	403,8	430,28
2014	433,8	440,08
2015	436,8	463,89
2016	466,7	473,31
2017	470,7	497,69
2018	500,0	507,12
2019	505,0	532,43
2020	534,3	243,21

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

(*) Modelo baseado em séries históricas de quantitativos de consumo de cimento e asfalto, população, PIB, depósitos à vista e empregos na construção. Este modelo foi usado para fazer as projeções futuras.

A Fonte 7 é baseada em informações e análises da economia mineral brasileira, segundo o IBRAM (2011). A Tabela 26 apresenta a evolução da demanda e projeções para até 2022.

Tabela 26 – Evolução da demanda e projeções para 2022

Ano	Produção de Areia (x10⁶)	Produção de Brita (x10⁶)
2002	165	108
2003	170	111
2004	187	129
2005	196	135
2006	212	146
2007	231	159
2008	252	174
2009	264	182
2010	267	184
2011	278	191
2012	289	200
2013	301	208
2014	313	216
2015	327	256
2016	342	268
2017	357	280
2018	357	293
2019	390	306
2020	410	321
2021	431	337
2022	453	354

Fonte: IBRAM (2011).

4.2.4.1 Resumo

As Tabelas 27 e 28 fazem uma compilação geral dos dados obtidos pelas sete fontes, nas quais se pode constatar divergências e variações nos valores. A Tabela 26 apresenta os dados da produção de areia para a construção e a Tabela 27 apresenta seu consumo. Embora os dados não sejam precisos, eles são, na maioria dos casos, coerentes e seguem uma mesma tendência.

Tabela 27 – Resumo das produções e projeções de produção de areia para construção no Brasil, entre as diversas fontes de dados (em milhões de toneladas)

Cenário	Frágil ^{(*)1}		Mais provável / Vigoroso ^{(*)2}		Otimista / Inovador ^{(*)3}		Produção ^{(*)4}	Modelo ^{(*)5}	
Fonte / Ano	Inventta	J. Mendo	Inventta	J. Mendo	Inventta	J. Mendo	Claudio Santiago ^{(*)6}	IBRAM	
2000							237,2	243.2	
2001							244,4	241.6	
2002							240,8	211.7	165
2003							214,1	218.5	170
2004							201,0	226.0	187
2005							238,0	247.3	196
2006							255,0	276.7	212
2007	229,4	279	229,4	279	229,4	279	279,0	314.6	231
2008	272,4	313	272,4	313	272,4	313	314,5	317.2	252
2009	266,9	335	266,9	335	266,9	335	311,1	366.3	264
2010	286,8	344	286,8	348	286,8	351	317,8	377.7	267
2011	298,3	354	304,0	362	309,7	369	372,8	399.4	278
2012	310,2	364	322,3	377	334,5	388	403,8	407.8	289
2013	322,6	374	341,6	392	361,3	407	403,8	430.3	301
2014	335,5	385	362,1	363	390,2	428	433,9	440.1	313
2015	348,9	395	383,8	408	421,4	449	436,9	463.9	327
2016	362,9	405	406,8	426	455,1	478	466,8	473.3	342
2017	377,4	415	431,2	445	491,5	509	470,7	497.7	357
2018	392,5	426	457,1	465	530,9	542	500,0	507.1	373

continua

conclusão

Cenário	Frágil ^(*1)		Mais provável / Vigoroso ^(*2)		Otimista / Inovador ^(*3)		Produção ^(*4)	Modelo ^(*5)	
Fonte / Ano	Inventta	J. Mendo	Inventta	J. Mendo	Inventta	J. Mendo	Claudio Santiago ^(*6)		IBRAM
2019	408,2	436	484,5	486	573,3	578	505,0	532.4	390
2020	424,5	447	513,6	508	619,2	615	534,3	243.2	410
2021	441,5	456	544,3	533	668,7	664			431
2022	459,2	465	577,1	560	722,2	717			453
2023		475		588		775			
2024		484		617		837			
2025		494		648		904			
2026		504		681		976			
2027		514		714		1.054			
2028		524		750		1.138			
2029		535		788		1.230			
2030		545		827		1.328			

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

^(*1) – PIB construção civil 4% ao ano/PIB nacional 2,3% ao ano.

^(*2) – PIB construção civil 6% ao ano/PIB nacional 4,6% ao ano.

^(*3) – PIB construção civil 8% ao ano/PIB nacional 6,9% ao ano.

^(*4) – Quantidade real até 2011 (ANEPAC + DNPM).

^(*5) – Modelo baseado no quantitativo de cimento, asfalto, PIB, população, depósitos à vista e empregos na construção. Este modelo foi usado para fazer as projeções futuras.

^(*6) – Metodologia utilizada pelo consultor.

Tabela 28 – Resumo do consumo e projeções de consumo de areia para construção no Brasil, entre as diversas fontes de dados
(em milhões de toneladas)

Cenário	Frágil ^(*)		Mais provável / Vigoroso ^(*)		Otimista / Inovador ^(*)	
	Inventta	J. Mendo	Inventta	J. Mendo	Inventta	J. Mendo
2000						
2001						
2002						
2003						
2004						
2005						
2006						
2007		267,7	229,4	267,7		267,7
2008		301,0	272,4	301,0		301,0
2009		322,0	266,9	322,0		322,0
2010		331,0	286,8	334,9		338,1
2011		340,3	304,0	348,3		355,0
2012		349,8	322,3	362,2		372,8
2013		539,6	341,6	376,7		391,8
2014		369,7	362,1	391,8		411,0
2015		380,0	383,8	407,4		431,5
2016		389,5	406,8	425,8		459,6
2017		399,3	431,2	444,9		489,4
2018		409,3	457,1	464,9		521,2

continua

conclusão

Cenário		Frágil ^(*1)		Mais provável / Vigoroso ^(*2)		Otimista / Inovador ^(*3)	
Ano/ Fonte	Inventta	J. Mendo	Inventta	J. Mendo	Inventta	J. Mendo	
2019		419,4	484,5	485,7		555,1	
2020		430,0	513,6	507,7		591,2	
2021		438,6	544,4	533,1		658,5	
2022		447,3	577,1	559,8		689,6	
2023		456,3		587,8		744,8	
2024		465,4		617,2		804,3	
2025		474,7		648,0		868,7	
2026		484,2		680,4		948,2	
2027		493,9		714,4		1.013,2	
2028		503,8		750,2		1.094,3	
2029		513,9		787,7		1.181,8	
2030		524,1		827,1		1.276,4	

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

^(*1) – PIB construção civil 4% ao ano/PIB nacional 2,3% ao ano.

^(*2) – PIB construção civil 6% ao ano/PIB nacional 4,6% ao ano.

^(*3) – PIB construção civil 8% ao ano/PIB nacional 6,9% ao ano.

4.2.5 Panorama brasileiro de areia industrial

O governo federal tem se empenhado em mapear o panorama mineral brasileiro. A grande extensão territorial e, principalmente, a existência de regiões menos desenvolvidas, torna este trabalho bastante desafiador. A seguir são apresentados os dados mais recentes sobre o bem mineral “areia industrial” no Brasil. Nota-se, nesta compilação, a ausência de dados por parte de alguns estados.

4.2.5.1 Principais áreas produtoras de areia industrial

Embora o Brasil seja um grande produtor de areia industrial, as principais operações estão concentradas na Região Sudeste do país. Coelho (2010) mapeou as principais áreas produtoras de areia industrial no Brasil e as representou na Figura 98.

Figura 98 – Principais áreas produtoras de areia industrial no Brasil

Fonte: Coelho (2010).

4.2.5.2 Dados estatísticos

Os dados estatísticos coletados e compilados sobre o panorama brasileiro de areia industrial (não incluindo quartzito industrial, quartzo e sílex) foram extraídos do mais recente Anuário Mineral Brasileiro (AMB), publicado pelo Departamento Nacional de Produção Mineral de 2010, ano base 2009 (DNPM, 2010).

A compilação se baseou em três classes:

- a) Brasil;
- b) Substância;
- c) Estados.

Estatística no Brasil: Foram coletados dados referentes às reservas brasileiras, bem como dados referentes às indústrias produtoras de areias industriais, tanto por setor, quanto por estados, valores monetários e mercados consumidores.

Reservas minerais de areia industrial

Medida – 1.411.867.004 t

Indicada – 522.557.587 t

Inferida – 310.612.285 t

Lavrável – 573.266.616

Produção bruta de minério

6.535.745 t

Produção beneficiada

4.926.239 t

Quantidade e valor da produção mineral comercializada

Areia Bruta:

706.206 t

R\$ 19.277.459,00

Beneficiada:

5.065.526 t

R\$ 162.546.329,00

Tabela 29 – Porte das minas

Grande >1.000.000 t ROM/ano	Média >100.000<1.000.000 t ROM/ano	Pequena >10.000<100.000 t ROM/ano	Total
1	11	28	40

Fonte: (DNPM, 2010).

Tabela 30 – Porte das usinas

Grande >1.000.000 t Minério Processado /ano	Média >100.000<1.000.000 t Minério Processado/ano	Pequena >10.000<100.000 t Minério Processado /ano	Total
2	10	10	22

Fonte: (DNPM, 2010).

Tabela 31 – Principais empresas produtoras

Posição (*)	Empresa
46	Votorantim Cimentos N/NE S.A.
50	Mineração Jundu Ltda.
51	CBE – Companhia Brasileira de Equipamentos

Fonte: (DNPM, 2010).

(*) – Entre as 100 maiores – Ano Base 2009.

Investimentos realizados nas minas:

R\$ 13.102.025,00

Investimentos realizados nas usinas:

R\$ 5.428.034,00

Mercado consumidor – Produtos brutos – Distribuição setorial**Principais setores:**

Cimento – 25,38%

Construção civil – 18,69%

Fundição – 14,95%

Argamassa – 13,36%

Revestimentos cerâmicos – 5,35%

Vidros – 1,98%

Mercado consumidor – Produtos beneficiados – Distribuição setorial**Principais setores:**

Construção civil – 30,67%

Vidros – 27,05%

Fundição – 24,77%

Argamassa – 6,45%

Produtos químicos – 4,77%

Filtros – 1,58%

Siderurgia – 1,28%

Mercado consumidor – Produtos brutos – Distribuição regional**Principais Estados:**

CE – 19,89%

SP – 19,70%

MG – 15,10%

PB – 13,39%

ES – 9,37%

SC – 6,01%

PE – 5,46%

RJ – 3,93%

BA – 2,02%

Mercado consumidor – Produtos beneficiados – Distribuição regional**Principais Estados:**

SP – 55,82%

SC – 13,18%

MG – 10,07%

PE – 5,06%

RJ – 4,24%

PB – 1,86%

RS – 1,59%

PR – 1,14%

Exportação do setor mineral (Semimanufaturados, manufaturados e compostos químicos)

437.918 t

US\$ 780.618 (FOB)

Importação do setor mineral (Semimanufaturados, manufaturados e compostos químicos)

417.629 t

US\$ 383.673.000 (FOB)

CFEM da exploração mineral – arrecadação

R\$ 13.745.824,00

Mão de obra utilizada na mineração – Tipo de contrato

Empregado – 2.739

Terceirizado – 472

Cooperativo – 9

Total – 3.220

Mão de obra utilizada na mineração – Categoria profissional

Nível superior – 273

Outros – 2.947

Total – 3.220

Estatísticas por substâncias

Reservas minerais

Medida – 1.411.593.809 t

Indicada – 522.557.587 t

Inferida – 310.612.285 t

Lavrável – 573.266.616 t

Quantidade e valor da produção mineral comercializada

Bruta:

504.327 t

R\$ 7.863.981,00

Beneficiada:

4.665.073 t

R\$ 155.293.472,00

Tabela 32 – Principais empresas produtoras

Empresa	UF	Participação
Mineração Jundu Ltda.	RS, SC, SP	45,23%
Mineração Descalvado Ltda.	SP	10,53%
Unimin do Brasil Ltda. (*)	SC	5,73%
Mineração Veiga Ltda.	SC	4,74%
Saint-Gobain do Brasil Produtos Industriais e para Construção Ltda.	MG, SP	4,69%
Empresa Brasileira do Quartzo Ltda.	BA, MG	2,89%
Empresa de Mineração Elias João Jorge Ltda.	SP	2,58%
Votorantim Cimentos N/NE S.A.	CE, PB	2,45%
Darcy R. O. Silva & Cia. Ltda.	SP	2,33%
Capuri Mineração S.A.	RJ	2,01%

Fonte: (DNPM, 2010).

(*) – Sibelco Sul América.

Mercado consumidor de produtos brutos - Distribuição regional**Principais Estados:**

CE – 19,98%

MG – 15,10%

PB – 13,86%

ES – 9,37%

SC – 6,01%

PE – 5,46%

RJ – 3,93%

BA – 2,02%

PR – 0,73%

Mercado consumidor de produtos brutos - Distribuição setorial**Principais Setores:**

Cimento – 25,38%

Construção – 18,69%

Fundição – 15,43%

Siderurgia – 14,95%

Argamassas – 13,36%

Revestimentos – 5,35%

Vidros – 1,98%

Mercado consumidor de produtos beneficiados - Distribuição regional**Principais Estados:**

SP – 55,82%

SC – 13,18%

MG – 10,07%

PE – 5,06%

RJ – 4,24%

PB – 1,86%

RS – 1,59%

PR – 1,14%

Mercado consumidor de produtos beneficiados - Distribuição setorial

Principais Setores:

Construção – 30,67%

Vidros – 27,06%

Fundição – 24,77%

Argamassas – 6,45%

Químico – 4,77%

Filtros – 1,58%

Siderurgia – 1,28%

Tabela 33 – Exportação de produtos - principais países de destino

Produtos Semifaturados, Manufaturados e Compostos	
Químicos	
428.918 t	
US\$ 780.617.000 (FOB)	
Principais Destinos	
Japão	
Estados Unidos	
Alemanha	
Noruega	
Argentina	
Itália	

Fonte: (DNPM, 2010).

Tabela 34 – Importação de produtos - principais países de origem

Produtos Semifaturados, Manufaturados e Compostos	
Químicos	
417.689 t	
US\$ 389.673.000 (FOB)	
Principais Origens	
China	
Estados Unidos	
Argentina	
Alemanha	
México	
Índia	
Venezuela	

Fonte: (DNPM, 2010).

Estatística por Estados: O mapeamento por estados revelou que alguns deles não possuem dados oficiais. Por esta razão, foram deixados propositalmente espaços em branco nas tabelas e gráficos a seguir.

Tabela 35 – Reservas de areia industrial por estados

Reservas Minerais (t)	Medida	Indicada	Inferida	Lavrável
Bahia	5.848.419	1.250.600		4.899.157
Ceará	18.546.701	3.444.066	1.824.269	16.005.662
Espírito Santo	2.182.820			376.479
Goiás	604.000	119.500	98.200	461.000
Minas Gerais	19.322.131	9.354.118	2.808.894	28.118.845
Mato Grosso do Sul				
Mato Grosso				
Pará	47.377.090	17.622.616		63.176.884
Paraíba	6.594.380	15.000	25.000	5.809.348
Pernambuco	6.017.155	3.639.487		4.706.401
Paraná	4.001.109	992.260		3.795.872
Rio de Janeiro	13.208.525	8.457.312	697.000	9.374.106
Rio Grande do Norte				
Rio Grande do Sul	7.413.476	8.080.121	36.928.400	6.927.872
Santa Catarina	266.668.036	89.751.957	51.740.907	59.359.545
Sergipe				
São Paulo	1.014.083.202	379.830.550	216.489.615	370.255.445
Tocantins				
TOTAL	1.411.867.044	522.557.587	310.612.285	573.266.616

Fonte: (DNPM, 2010).

Gráfico 1 – Reservas de areia industrial por estados

Fonte: Elaborado pelo autor, dados extraídos do DNPM (2010).

Tabela 36 – Produção de areia industrial por estados

Produção Bruta de Minério (t ROM)	
Bahia	7.540
Ceará	141.088
Espírito Santo	81.626
Goiás	
Minas Gerais	152.698
Mato Grosso do Sul	1.952
Mato Grosso	
Pará	36.723
Paraíba	116.563
Pernambuco	273.605
Paraná	3.812
Rio de Janeiro	68.646
Rio Grande do Norte	
Rio Grande do Sul	72.002
Santa Catarina	766.810
Sergipe	
São Paulo	3.913.738
Tocantins	
TOTAL	5.636.803

Fonte: (DNPM, 2010).

Gráfico 2 – Produção de areia industrial por estados

Fonte: Elaborado pelo autor, dados extraídos do DNPM (2010).

Tabela 37 – Produção beneficiada de areia industrial por estados

Produção Beneficiada (t Produto)	
Bahia	
Ceará	
Espírito Santo	
Goiás	
Minas Gerais	120.464
Mato Grosso do Sul	
Mato Grosso	
Pará	25.706
Paraíba	94.362
Pernambuco	250.330
Paraná	871
Rio de Janeiro	73.091
Rio Grande do Norte	
Rio Grande do Sul	78.659
Santa Catarina	746.722
Sergipe	
São Paulo	3.143.541
Tocantins	
TOTAL	4.533.746

Fonte: (DNPM, 2010).

Gráfico 3 – Produção beneficiada de areia industrial por estados

Fonte: Elaborado pelo autor, dados extraídos do DNPM (2010).

Tabela 38 – Valoração da produção de areia industrial

Quantidade e Valor da Produção Comercializada				
	Bruta		Beneficiada	
	(t)	(R\$)	(t)	R\$
Bahia	7.540	37.700		
Ceará	141.088	2.481.542		
Espírito Santo	76.606	989.687		
Goiás				
Minas Gerais	9.489	504.889	111.253	1.363.306
Mato Grosso do Sul	1.952	12.270		
Mato Grosso				
Pará	7.054.607	71.638.099	4.510	18.130
Paraíba	109.238	1.072.455	94.361	989.255
Pernambuco	23.862	49.629	256.282	3.464.002
Paraná	2.736	13.479	871	205.881
Rio de Janeiro	163	742	65.448	3.649.671
Rio Grande do Norte				
Rio Grande do Sul			78.659	2.918.398
Santa Catarina	13.675	198.485	747.554	30.342.045
Sergipe				
São Paulo	114.978	2.505.105	3.284.939	109.740.419
Tocantins				
TOTAL	7.555.934	79.504.082	4.643.877	152.691.107

Fonte: (DNPM, 2010).

Gráfico 4 – Valoração da produção de areia industrial

Fonte: Elaborado pelo autor, dados extraídos do DNPM (2010).

Tabela 39 – Porte das minas de areia industrial

Porte das Minas				
	Grande	Média	Pequena	Total
Bahia				
Ceará		1		1
Espírito Santo			1	1
Goiás			1	1
Minas Gerais		3	7	10
Mato Grosso do Sul				
Mato Grosso				
Pará			1	1
Paraíba		1	1	2
Pernambuco			5	5
Paraná				
Rio de Janeiro			1	1
Rio Grande do Norte				
Rio Grande do Sul			1	1
Santa Catarina		2	9	11
Sergipe				
São Paulo	1	4	2	7
Tocantins				
TOTAL	1	11	29	41
	Porte:	ROM (t/ano)		
	Grande	> 1.000.000		
	Média	> 100.00 < 1.000.000		
	Pequena	> 10.000 < 100.000		

Fonte: (DNPM, 2010).

Gráfico 5 – Porte das minas de areia industrial

Fonte: Elaborado pelo autor, dados extraídos do DNPM (2010).

Tabela 40 – Porte das usinas de beneficiamento de areia industrial

Porte das Usinas				
	Grande	Média	Pequena	Total
Bahia				
Ceará				
Espírito Santo				
Goiás				
Minas Gerais		1	4	5
Mato Grosso do Sul				
Mato Grosso		1		1
Pará			1	1
Paraíba	1	1	1	3
Pernambuco		1	1	2
Paraná			1	1
Rio de Janeiro			1	1
Rio Grande do Norte				
Rio Grande do Sul			1	1
Santa Catarina		3	2	5
Sergipe			1	1
São Paulo	1	5	2	8
Tocantins				
TOTAL	2	12	15	29
	Porte:	Minério processado (t/ano)		
	Grande	> 1.000.000		
	Média	>100.00<1.000.000		
	Pequena	>10.000<100.000		

Fonte: (DNPM, 2010).

Gráfico 6 – Porte das usinas de beneficiamento de areia industrial

Fonte: Elaborado pelo autor, dados extraídos do DNPM (2010).

Tabela 41 – Principais empresas produtoras de areia industrial e posição de mercado

Principais Empresas Produtoras		
	Posição (*)	Empresa
Bahia		
Ceará	46	Votorantim Cimentos N/NE Ltda.
Espírito Santo		
Goiás		
Minas Gerais		
Mato Grosso do Sul		
Mato Grosso		
		Dow Corning Metais do Pará Indústria e Comércio
Pará		Ltda.
	46	Votorantim Cimentos N/NE Ltda.
Paraíba	69	Millennium Inorganics Chemicals Mineração Ltda.
	51	CBE - Cia. Brasileira de Equipamento
Pernambuco		CIV - Cia. Industrial de Vidros
Paraná		
Rio de Janeiro		
Rio Grande do Norte		
Rio Grande do Sul	50	Mineração Jundu Ltda. (**)
	50	Mineração Jundu Ltda. (**)
		Mineração Veiga
Santa Catarina		Unimin do Brasil
Sergipe		
	50	Mineração Jundu Ltda.
São Paulo		Mineração Descalvado Ltda. (**)
Tocantins		

Fonte: (DNPM, 2010).

(*): Entre as 100 maiores - base 2009.

(**): Não apontado no AMB 2010.

Tabela 42 – Investimentos realizados nas minas

Investimentos Realizados nas Minas (R\$)	
Bahia	745.811,00
Ceará	322.500,00
Espírito Santo	30.000,00
Goiás	35.000,00
Minas Gerais	9.033.131,00
Mato Grosso do Sul	
Mato Grosso	
Pará	234.698
Paraíba	129.500
Pernambuco	58.000
Paraná	871.864
Rio de Janeiro	82.700
Rio Grande do Norte	
Rio Grande do Sul	26.413
Santa Catarina	45.550
Sergipe	94.025
São Paulo	1.488.858
Tocantins	
TOTAL	13.198.050,00

Fonte: (DNPM, 2010).

Gráfico 7 – Investimentos realizados nas minas

Fonte: Elaborado pelo autor, dados extraídos do DNPM (2010).

Tabela 43 – Investimentos realizados nas plantas de beneficiamento

Investimentos Realizados nas Usinas (R\$)	
Bahia	
Ceará	
Espírito Santo	
Goiás	
Minas Gerais	1.382.000,00
Mato Grosso do Sul	
Mato Grosso	
Pará	
Paraíba	
Pernambuco	140.000,00
Paraná	800.000,00
Rio de Janeiro	576.859,00
Rio Grande do Norte	
Rio Grande do Sul	320.000,00
Santa Catarina	524.989,00
Sergipe	
São Paulo	1.684.186,00
Tocantins	
TOTAL	5.428.034,00

Fonte: (DNPM, 2010).

Gráfico 8 – Investimentos realizados nas plantas de beneficiamento

Fonte: Elaborado pelo autor, dados extraídos do DNPM (2010).

Tabela 44 – Mercado consumidor de produtos brutos (distribuição setorial)

Mercado Consumidor - Produtos Brutos		
Distribuição Setorial		
	Setores	%
	Construção	53,83
Bahia	Fe Ligas	44,51
Ceará	Cimento	100
Espírito Santo	Construção Civil	100
Goiás		
	Fe Ligas	76,22
	Vidros	6,60
	Revestimentos	6,47
	Metalurgia	3,05
Minas Gerais	Construção Civil	1,33
Mato Grosso do Sul	Aterro	100
Mato Grosso		
Pará		
	Argamassas	86,37
Paraíba	Cimento	13,05
Pernambuco	Cimento	100
	Cerâmica	28,61
	Cal	19,85
	Construção Civil	17,50
	Revestimentos	16,66
	Isolante Elétrico	5,83
Paraná	Refratários	3,48
Rio de Janeiro	Construção Civil	100
Rio Grande do Norte		
Rio Grande do Sul		
	Revestimentos	65,97
	Construção Civil	19,23
	Cerâmica	12,65
Santa Catarina	Fundição	1,85
Sergipe		
	Fundição	67,82
	Construção Civil	20,01
	Fe Ligas	4,60
São Paulo	Vidros	3,79
Tocantins		

Fonte: (DNPM, 2010).

Tabela 45 – Mercado consumidor de produtos beneficiados (distribuição setorial)

Mercado Consumidor - Produtos Beneficiados		
Distribuição Setorial		
	Setores	%
Bahia		
Ceará		
Espírito Santo		
Goiás	Construção	100
	Argamassas	46,27
	Construção Civil	27,00
Minas Gerais	Cimento	13,87
	Vidros	4,25
	Estradas	3,35
Mato Grosso do Sul		
Mato Grosso		
Pará	Metalurgia	100
Paraíba	Argamassas	99,98
	Vidro	66,23
	Argamassas	24,34
Pernambuco	Cimento	3,45
	Construção Civil	3,48
	Abrasivos	3,48
	Construção Civil	75,02
	Refratário	14,49
Paraná	Cerâmica	7,49
	Cal	3,00
Rio de Janeiro	Vidro	46,36
	Siderurgia	26,50
	Construção Civil	26,15
Rio Grande do Norte		
	Fundição	65,00
Rio Grande do Sul	Vidro	25,00
	Argamassa	10,00
	Construção Civil	54,12
Santa Catarina	Vidro	27,37
	Siderurgia	6,32
Sergipe	Construção Civil	100

continua

conclusão

Mercado Consumidor - Produtos Beneficiados		
Distribuição Setorial		
	Setores	%
São Paulo	Fundição	31,91
	Construção Civil	28,27
	Vidro	26,81
	Químico	6,91
	Filtros	2,29
	Argamassa	1,65
	Revestimentos	1,16
Tocantins		

Fonte: (DNPM, 2010).

Tabela 46 – Mercado consumidor de produtos brutos (distribuição regional)

Mercado Consumidor - Produtos Brutos		
Distribuição Regional		
	Estados	%
Bahia	BA	92,64
	ES	2,68
	MG	2,42
Ceará	Mercado Externo	1,71
	CE	100
Espírito Santo	ES	80,79
	Não Informado	19,21
Goiás		
Minas Gerais	MG	83,16
	RJ	6,60
	SP	6,36
Mato Grosso do Sul	MS	100
Mato Grosso		
Pará		
Paraíba	PB	86,37
	PE	13,46
Pernambuco	PE	100

continua

conclusão

Mercado Consumidor - Produtos Brutos		
Distribuição Regional		
	Estados	%
	PR	40,13
Paraná	SP	22,49
	SC	12,11
	Não Informado	25,27
Rio de Janeiro	RJ	100
Rio Grande do Norte		
Rio Grande do Sul		
Santa Catarina	SC	96,78
	Não Informado	3,22
Sergipe		
São Paulo	SP	80,35
	RJ	12,31
	MG	4,08
	Não Informado	2,38
Tocantins		

Fonte: (DNPM, 2010).

Tabela 47 – Mercado consumidor de produtos beneficiados (distribuição regional)

Mercado Consumidor de Produtos Beneficiados		
Distribuição Regional		
	Estados	%
Bahia		
Ceará		
Espírito Santo		
Goiás	SP	100
	MG	93,32
Minas Gerais	RJ	4,78
Mato Grosso do Sul		
Mato Grosso		
Pará	PA	100
Paraíba	PB	99,98
Pernambuco	PE	100

continua

conclusão

Mercado Consumidor de Produtos Beneficiados		
Distribuição Regional		
	Estados	%
Paraná	PR	72,44
	SP	11,26
	SC	5,08
	MG	1,89
Rio de Janeiro	RJ	99,18
	SP	0,82
Rio Grande do Norte		
Rio Grande do Sul	RS	92,00
	Não Informado	8,00
	SC	87,39
Santa Catarina	PR	7,54
	SP	0,82
	SE	85,00
Sergipe	Não Informado	15,00
	SP	79,11
	MG	8,59
São Paulo	RJ	3,97
	Não Informado	7,76
Tocantins		

Fonte: (DNPM, 2010).

4.3 MINERAÇÃO JUNDU

Prelúdio

*Esta seção foi inserida devido à baixa disponibilidade de informações sobre areias na Biblioteca do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da EPUSP. O material existente, embora muito bem escrito, está naturalmente desatualizado. A Mineração Jundu, além de estar apoiando e financiando este estudo, é a empresa com maior tradição na produção de areias industriais no Brasil. Portanto, tornou-se interessante a inclusão destas informações. Esta seção foi escrita com base em informações internas da empresa, apresentações comerciais e descritivos técnicos de uso interno. Descreve as unidades produtivas da empresa, métodos de lavra e beneficiamento mineral. A seção oferece informações relativas ao bem mineral estudado nesta Tese, **areia**, e não trata de Mineração Oceânica, embora uma unidade produtiva da empresa utilize a dragagem subaquática lacustre como método de lavra (Unidade de Balneário Barra do Sul, SC).*

4.3.1 Histórico da empresa

A Mineração Jundu foi fundada em fevereiro de 1959, cuja atividade principal era a produção de areia silicosas para os mercados de fundição, fabricação de vidro, cerâmica, indústrias químicas, abrasivos, meios filtrantes e de fraturamento de poços petrolíferos.

A empresa iniciou suas atividades extraíndo e beneficiando areias silicosas no litoral sul do Estado de São Paulo, nas proximidades de praias. Naquele ambiente é abundante um tipo de vegetação denominada “Jundu²³”, do qual se tomou emprestado o nome. Em 1995, a Mineração Jundu associou-se ao grupo francês Saint-Gobain e no final de 1999 incorporou as unidades da Santa Suzana Mineração, uma empresa criada em 1976 a partir do departamento de matérias primas da Companhia de Vidraria Santa Marina.

Em março do ano de 2002, o grupo Saint-Gobain estabeleceu uma *joint-venture* com a empresa norte americana UNIMIN, controlada pelo grupo belga SIBELCO, que detém a liderança mundial no mercado de areia industrial.

Atualmente a Mineração Jundu opera em seis unidades no Brasil, assim distribuídas:

²³ Jundu, do Tupi *Jũ'du*: vegetação adjacente às dunas ou às praias, caracterizada pela frequência de formas xerofíticas.

- a) Analândia - SP: areias quartzosas e sílica moída;
- b) Descalvado - SP: areias quartzosas e areias cobertas;
- c) Bom Sucesso de Itararé - SP: calcário dolomítico;
- d) São João Del Rei - MG: calcário calcítico;
- e) Balneário Barra do Sul - SC: areias quartzosas;
- f) Viamão - RS: areias quartzosas.

A Figura 99 apresenta a distribuição geográfica das unidades.

Figura 99 – Localização geográfica das operações da Mineração Jundu

Fonte: Mineração Jundu (2007).²⁴

4.3.2 Pesquisa geológica

As pesquisas geológicas são realizadas por meio de sondagens e/ou amostragens diretas nas frentes de lavra, e permitem a obtenção de amostras dos diversos corpos de minério. Nos depósitos de areia, os métodos de sondagem

²⁴ As fotos de Mineração Jundu pertencem aos arquivos particulares da empresa.

utilizados são a trado ou a rotativa, dependendo da profundidade ou do grau de consolidação que se queira amostrar.

As amostras e testemunhos de sondagem são preparados e caracterizados nos laboratórios internos da Mineração Jundu. Os parâmetros analisados variam de acordo com o futuro uso, conforme segue:

- a) areias para fundição: distribuição granulométrica e teor de argila;
- b) areias para vidro: distribuição granulométrica, teor de argila e análises químicas para SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 e TiO_2 .

Com os resultados da caracterização tecnológica são criados bancos de dados que contêm: identificação do furo, cota da boca do furo, cota de topo e base de cada amostra, litologia e demais parâmetros químicos e granulométricos de cada amostra.

Posteriormente são realizadas análises geoestatísticas e modelos geológicos são atribuídos a cada mina.

4.3.3 Unidades produtivas

Serão abordadas nesta seção apenas as quatro unidades produtivas de areia da Mineração Jundu, pois as duas unidades produtoras de calcário não são relevantes para esta Tese.

4.3.3.1 Unidade de Analândia

A Unidade de Analândia – SP (Figura 100) produz areia de sílica para atender aos mercados de fundição, indústria do vidro, indústrias químicas, de cerâmica e do petróleo. Outro produto importante produzido nesta unidade é a farinha de sílica (*silica flour*), para abastecer os mercados de fibra de vidro, química, cerâmica e petróleo e gás.

Figura 100 – Vista aérea da Unidade de Analândia

Fonte: Mineração Jundu (2007).

A atual capacidade produtiva da Unidade de Analândia é de 1,5 Mt de produtos.

A geologia da mina é composta basicamente por sedimentos arenosos formados na Era Cenozoica, Período Terciário (de 65 a 1,8 milhões de anos) e de arenitos formados na Era Mesozoica, Períodos Triássico ao Cretáceo (de 280 a 141 milhões de anos).

Sob o ponto de vista operacional, é importante a diferenciação entre os sedimentos arenosos e os arenitos por serem matérias primas para produção de diferentes produtos. Na prática operacional, os sedimentos arenosos são classificados como materiais particulados, compostos predominantemente por grãos de areia, friáveis, sem compactação e estruturas deposicionais. Os arenitos, por sua vez, compreendem um material particulado, composto predominantemente por grãos de areia, com compactação variável e estruturas deposicionais (acamamento).

O perfil geológico da Mina de Analândia é representado pela Figura 101.

Figura 101 – Perfil geológico esquemático da Mina de Analândia

Fonte: Mineração Jundu (2007).

A primeira camada (Figura 102), formada por sedimentos da cobertura Cenozoica e Arenitos da Formação Botucatu possui teor de ferro (Fe₂O₃) da ordem de 0,150% (1.500 ppm) e é utilizada para a indústria de fundição.

Figura 102 – Camada superior, formada por sedimentos da Era Cenozoica e Arenitos da Formação Botucatu

Fonte: Mineração Jundu (2007).

A segunda camada (Figura 103), formada por arenitos da Formação Piramboia possui baixo teor de Fe_2O_3 (0,020% ou 200 ppm) e, após beneficiada, se torna apropriada para a indústria de fabricação de vidros.

Figura 103 – Camada intermediária, formada por arenitos da Formação Piramboia

Fonte: Mineração Jundu (2007).

A terceira camada (Figura 104), também formada por arenitos da Formação Piramboia, contém teores de Fe_2O_3 variando de 0,020% a 0,030% (200 a 300 ppm) e é utilizada para produção de areia vidreira.

Figura 104 – Camada inferior, formada por arenitos da Formação Piramboia

Fonte: Mineração Jundu (2007).

4.3.3.1.1 Operação

A lavra é realizada a céu aberto, através de escavação mecânica e o beneficiamento é necessário para adequação das qualidades físicas e químicas de acordo com a utilização.

O tratamento do minério é composto pelas etapas de peneiramento, classificação, atrição, deslamagem e flotação, conforme diagrama esquemático representado pela Figura 105.

Figura 105 – Diagrama esquemático do tratamento de minérios da Unidade de Analândia

Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

4.3.3.2 Unidade de Descalvado

A Unidade de Descalvado – SP (Figura 106), onde também está instalada a sede da empresa, produz areia de sílica para atender aos mercados de fundição, indústria do vidro, indústrias químicas, de cerâmica e petróleo. Importantes produtos

produzidos nesta unidade são areais especiais recobertas por resinas fenólicas e *Shell Molding*, utilizadas para fabricação de moldes de alta precisão.

Figura 106 – Vista aérea da Unidade de Descalvado

Fonte: Mineração Jundu (2007).

A atual capacidade produtiva da Unidade de Descalvado é de 1,5 Mt de produtos.

A geologia da mina é semelhante à de Analândia, composta basicamente por sedimentos arenosos formados na Era Cenozoica, Período Terciário (de 65 a 1,8 milhões de anos) e de arenitos formados na Era Mesozoica, Períodos Trássico ao Cretáceo (de 280 a 141 milhões de anos). O perfil geológico da Mina de Descalvado é representado pela Figura 107.

Figura 107 – Perfil geológico esquemático da Mina de Descalvado

Fonte: Mineração Jundu (2007).

A primeira camada (Figura 108), formada por sedimentos da cobertura Cenozoica, é lavrada e beneficiada para a indústria de fundição.

Figura 108 – Cobertura Cenozoica na Mina de Descalvado

Fonte: Mineração Jundu (2007).

A segunda camada é formada por arenitos não lixiviados da Formação Botucatu que, após tratamento, são transformados em matéria prima para a produção de vidros.

A terceira camada (Figura 109) é formada por arenitos da Formação Piramboia, não lixiviados com médios a baixos teores de ferro, cujos produtos, após beneficiamento, são utilizados na indústria vidreira.

Figura 109 – Camada de arenito da Formação Piramboia

Fonte: Mineração Jundu (2007).

Existe um quarto tipo geológico, intercalado entre a segunda e a terceira camada que são arenitos lixiviados de ambas as Formações, Botucatu e Piramboia. Trata-se de areias de baixo teor de ferro, sendo produzidas para fabricação de vidros.

4.3.3.2.1 Operação

A operação de lavra ocorre a céu aberto, utilizando o processo de desmonte mecânico com pá-carregadeira e escavadeira hidráulica. O minério desmontado é transportado até as usinas de beneficiamento por caminhões basculantes que alimentam a moega da planta.

O tratamento do minério consta de etapas de peneiramento, classificação, atrição, deslamagem e separação magnética, conforme diagrama esquemático representado pela Figura 110.

Figura 110 – Diagrama esquemático do tratamento de minérios da Unidade de Descalvado

Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

4.3.3.3 Balneário Barra do Sul

A Unidade de Balneário Barra do Sul – SC (Figura 111) produz areias quartzosas para a produção de vidro e peças de fundição.

Figura 111 – Vista aérea da Unidade de Balneário Barra do Sul

Fonte: Mineração Jundu (2007).

A mina é formada por sedimentos arenosos de origem marinha e continental depositadas em planície costeira, em ambientes alagadiços. Esses sedimentos foram formados na Era Cenozoica, Período Quaternário, com idade de menos de 1,8 milhões de anos.

O depósito é constituído de sedimentos normalmente finos com espessura máxima da ordem de 20 metros, em sua maior parte situado abaixo do nível freático. Ocorrem eventuais intercalações de níveis de turfa ou concreções ferruginosas.

A unidade de Balneário Barra do Sul tem a capacidade produtiva de 160 kt por ano.

O método de lavra utilizado é por dragagem por corte e sucção em ambiente lacustre (Figura 112), onde se utiliza uma maraca de corte (Figura 113), para maior aproveitamento da jazida.

Figura 112 – Draga utilizada para lavra subaquática de areia industrial em Balneário Barra do Sul

Fonte: Mineração Jundu (2014).

Figura 113 – Detalhe da maraca de corte

Fonte: Mineração Jundu (2014).

4.3.3.3.1 Operação

A lavra ocorre a céu aberto, sendo a extração do minério na frente de lavra feita pelo processo de dragagem subaquática por sucção, através de bombeamento do minério, com recalque da polpa diretamente para a usina de beneficiamento.

O tratamento do minério consta de etapas de peneiramento, classificação, atrição, deslamagem e separação magnética, conforme diagrama esquemático representado pela Figura 114.

Figura 114 – Diagrama esquemático do tratamento de minérios da Unidade de Balneário Barra do Sul

Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

4.3.3.4 Unidade de Viamão

A Unidade de Viamão – RS (Figura 115) produz areias quartzosas para indústrias de fundição e areais de faturamento de poços petrolíferos.

Figura 115 – Unidade de Viamão

Fonte: Mineração Jundu (2007).

A jazida é formada por sedimentos arenosos de origem marinha e continental, da Era Cenozoica, entre os Períodos Terciário e Quaternário (menos de 65 milhões de anos). Houve um retrabalhamento eólico dos depósitos, originando novas formações, em forma de dunas.

A espessura média do minério é de 4 metros, limitado por uma camada de argila subjacente às de areia, limitando a lavra em profundidade e confinando aquífero local. Também podem ser observadas camadas de turfa de pequena espessura entre os sedimentos arenosos, como pode ser visualizado na Figura 116.

Figura 116 – Detalhes das camadas sedimentares na Mina de Viamão

Fonte: Mineração Jundu (2007).

4.3.3.4.1 Operação

A lavra ocorre a céu aberto, sendo a extração do minério na frente de lavra feita pelo processo de desmonte mecânico, através de pá-carregadeira e escavadeira hidráulica. O minério desmontado é transportado até a usina de beneficiamento por caminhões basculantes que alimentam uma moega na usina de beneficiamento.

O tratamento do minério consta de etapas de peneiramento, classificação e deslamagem, conforme diagrama esquemático representado pela Figura 117.

Figura 117 – Diagrama esquemático do tratamento de minérios da Unidade de Viamão

Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

4.3.4 Principais produtos

A Mineração Jundu foca basicamente dois mercados, indústria vidreira e indústria de fundição. Entretanto, outros tipos de areia também são produzidas. A seguir são apresentados os principais produtos da empresa:

- a) Areias industriais para fabricação de vidros (*Glass Sand*);
- b) Areias para indústria de fundição (*Foundry Sand*);
- c) *Shell Molding*;
- d) Areia para indústria de cerâmica e refratários;
- e) Areias para fraturamento de poços petrolíferos (*Frac Sand*);
- f) Calcário para indústria de vidros;
- g) Dolomita para indústria de vidros.

Algumas areias produzidas pela Mineração Jundu também são utilizadas em processos de moagem para fabricação de sílica moída (*silica flour*), um produto de alta pureza em silício e de granulometria fina. Os principais usos da sílica moída são para compor a fabricação de:

- a) Tintas;
- b) Plásticos;
- c) Borrachas;
- d) Fritas cerâmicas;
- e) Esmaltes;
- f) Monofilamentos de fibras de reforço (fibra de vidro);
- g) Abrasivos.

A Mineração Jundu produz também areias especiais para os seguintes segmentos:

- a) Argamassa;
- b) Agregados;
- c) Concretos;
- d) Campos de futebol *society* (gramados sintéticos);
- e) Quadras esportivas de areia;
- f) Campos de golfe (*green sand*), de acordo com as normas USGA (*United States Golf Association*);
- g) Hípicas e haras;
- h) Filtros de piscina (isenção de matéria orgânica, carbonatos, cloretos e argilas), sendo a granulometria controlada através de tamanhos efetivos e coeficiente de uniformidade.

Como subprodutos, a Mineração Jundu fornece uma gama de areias grossas, cascalhos e pedregulhos para construção civil.

4.4 A BAÍA DE GUANABARA

A Baía de Guanabara, mundialmente conhecida por sua beleza, também é uma região economicamente importante para o estado do Rio de Janeiro e para o Brasil, sendo portal de acesso de navios cargueiros provenientes de vários países. Ao se descobrir a potencialidade de uma operação de mineração oceânica sustentável em seu leito, a Baía de Guanabara poderá contribuir ainda mais para o desenvolvimento da região e do país.

4.4.1 Aspectos gerais

De acordo com Amador (2012), a Bacia da Baía de Guanabara está localizada entre os paralelos de 22°24' e 22°57' de latitude Sul e os meridianos de 42°33' e 43°19' W.

A Baía de Guanabara possui um formato irregular, alongando-se no sentido dos meridianos e estreitando-se no sentido dos paralelos. Em função de sua localização geográfica, o território da Bacia da Guanabara (Figura 118) está inteiramente compreendido na área intertropical e, em decorrência disso, possui clima quente e chuvoso (tipicamente tropical).

Figura 118 – Bacia da Guanabara

Fonte: Amador (2012).

A Bacia da Guanabara está inserida, no *litoral das escarpas cristalinas*, que se estende do Norte do Estado do Rio de Janeiro ao Cabo de Santa Marta (SC) Silveira (1964 apud AMADOR, 2012). A principal característica deste litoral é a presença marcante do Embasamento Cristalino, que ora mergulha no mar, formando pontões, costões ou ilhas, ora recua, se transformando na Serra do Mar, herança da escarpa de falha. Excetuando os maiores rios, como o Paraíba, o Ribeira do Iguape e o Itajaí, os rios que drenam a região e deságuam no mar são rios jovens, surgidos após o soerguimento da Serra do Mar. Cinquenta e cinco rios drenam a Bacia da Guanabara, sendo os principais os Rios Macacum Guapiaçu, Guapimirim, Caceribu, Guaxindiba, Guaraí, Imboassica, Magé, Estrela, Saracuruna, Meriti, Iguaçu e Pavuna.

A Bacia da Guanabara conta com uma área de aproximadamente 4.600 km² (incluindo a Baía de Guanabara), e praticamente engloba toda a região metropolitana do Rio de Janeiro. Inclui total ou parcialmente os Municípios do Rio de Janeiro, Niterói, São Gonçalo, Itaboraí, Tanguá, Rio Bonito, Cachoeiras de Macacu, Guapimirim, Magé, Petrópolis, Duque de Caxias, São João de Meriti, Nova Iguaçu, Nilópolis, Belford Roxo e Mesquita (Figura 119).

Figura 119 – Municípios da Baía de Guanabara

Fonte: Amador (2012).

4.4.2 Geologia na Bacia da Guanabara

Amador (2012) explica que foram povos tupi-guarani e seus ancestrais quem primariamente tiveram contato com a geologia da Bacia da Guanabara. Além de se utilizarem de diversos recursos minerais, como seixos de diabásio, lascas de quartzo, caulim, entre outros em suas rotinas de vida, conseguiam representar suas localizações em mapas.

Backheuser (1918), entre as décadas de 1910 e 1920, foi o primeiro pesquisador brasileiro a dedicar-se sistematicamente aos estudos de caráter geológico-geomorfológico sobre a região da Guanabara, produzindo textos relacionados à tectônica, variação do nível do mar, petrografia e assoreamento da Baía.

Hembold (1967) estabeleceu uma subdivisão para o Pré-Cambriano, individualizando duas sequências litológicas. Na primeira, predominariam *gneisses* de textura grosseira, enquanto na segunda, os biotita-*gneisses* e *gneisses* facoidais seriam predominantes.

O Grupo Pão de Açúcar seria composto basicamente por *gneisses* de composição granítica a tonalítica, texturas granoblásticas e granular a porfiroblásticas (facoidal). Pode-se considerar gradações entre os *augen gneisses* e os granitos porfíroides, charnockitos, milonitos e biotita *gneisses* associam-se *gneisses* ricos em biotita e faixas apolíticas (AMADOR, 2012).

O Grupo Sepetiba seria constituído por *gneisses* fitados ricos em silimanita, cordierita, biotita e granada (kinzigitos); microclina pértica, magnetita e ilmenita também são frequentes. A Figura 120 oferece uma visão geral da geologia da Baía de Guanabara.

Figura 120 – Mapa geológico do embasamento da porção centro-ocidental do “Rift” da Guanabara

Fonte: Amador (1998 apud AMADOR, 2012).

Segundo Amador (2012), a bacia que contribui para a Baía de Guanabara drena no seu conjunto uma área aproximada de 4.600 km², constituída por rochas gnáissicas e graníticas Pré-Cambrianas, rochas alcalinas cenozoicas, depósitos continentais cenozoicos das formações Pré-Macacu, Macacu e Caceribu, bem como sedimentos holocênicos fluviais, coluviais, marinhos e fluviomarinhos.

4.4.2.1 Classificação dos sedimentos de fundo, com base no diagrama triangular de Shepard (1954)

De acordo com o sistema classificatório de sedimentos proposto por Shepard (1954) e com base no diagrama triangular, estão presentes na Baía de Guanabara dez tipos de sedimentos, cuja distribuição pode ser observada no Mapa de Classificação Textural (Figura 121).

Figura 121 – Classificação textural dos sedimentos de fundo da Baía de Guanabara baseado no Diagrama Triangular de Shepard (1954)

Fonte: Amador (1992, 1997 apud AMADOR, 2012) e Shepard (1954).

Segundo esse mapa, predominaram na Baía de Guanabara as areias e as lamas sílticas.

As areias distribuem-se ao longo dos canais autodragáveis; o canal principal, que é o antigo talvegue do sistema fluvial pleistocênico, e o canal entre a Ilha do Governador e o continente. As areias também dominam na região oceânica da Baía de Guanabara e em áreas situadas junto à foz de alguns rios da Baixada (AMADOR, 2012).

As fácies lamosas que predominam no conjunto da Baía de Guanabara, estão associadas às áreas submetidas a menor energia do sistema de circulação.

Os sedimentos arenosos possuem origem distinta conforme a área considerada. As areias da região externa da Baía de Guanabara são produtos da ação de mecanismos litorâneos e têm sua origem principal no retrabalhamento e transporte de sedimentos pleistocênicos da plataforma continental. As areias do canal principal (talvegue), que é aproximadamente balizado pela isóbata de 10 metros, estendem-se da entrada da barra até as proximidades da Ilha de Paquetá.

Elas são explicadas pela atuação de correntes concentradas de maré, que produzem o transporte dos sedimentos mais finos e a concentração residual de areias (mecanismo denominado *by passing*).

As areias que se dispõem ao longo do canal entre a Ilha do Governador e do continente estão associadas à concentração de energia produzida por correntes de maré, causada pelo estreitamento da seção do canal, o que não só produz o *by passing* dos sedimentos finos (gerados em grande quantidade na área do fundo da baía), como também a erosão, retrabalhamento e transporte dos sedimentos pleistocênicos do assoalho da baía (AMADOR, 2012).

4.4.2.2 Frequência de areia nos sedimentos

A Figura 122 reproduz a distribuição observada no mapa de Classificação dos Sedimentos (Tipologia), realçando as transições entre os domínios arenosos e lamosos.

Figura 122 – Frequência de areia nos sedimentos de fundo

Fonte: Amador (2012).

Pode-se observar nitidamente que, no fundo da Baía de Guanabara as faixas de sedimentos mais arenosos ocorrem junto à foz dos rios, gradando para as lamas, que ocupam a área central da região, com percentagem de areia inferior a 5%.

Já na área do canal da Ilha do Governador, nota-se nitidamente o contraste dos depósitos arenosos com os sedimentos lamosos, que contém menos de 10% de areia (AMADOR, 2012).

Mediana: Com esta medida de tendência central que define o tamanho mediano da distribuição, Amador (2012) qualifica os diversos tipos de sedimentos presentes na Baía de Guanabara (Figura 123).

Figura 123 – Distribuição da mediana nos sedimentos de fundo

Fonte: Amador (2012).

4.4.2.3 Classes de arredondamento

Amador (2012) classifica as classes de arredondamento dos grãos de quartzo nos sedimentos da Baía de Guanabara conforme a Tabela 48.

Tabela 48 – Classes de arredondamento dos grãos de quartzo

Denominação	Classe/Subclasse
Anguloso	0,125 – 0,150
Subanguloso	0,150 – 0,175
	0,175 – 0,200
	0,200 – 0,225
Subarredondado	0,225 – 0,250
	0,250 – 0,275
	0,300 – 0,325
Arredondado	0,325 – 0,350
	0,350 – 0,375

Fonte: Amador (2012).

A Figura 124 apresenta o mapeamento de acordo com a classificação por classes de arredondamento.

Figura 124 – Classes de arredondamentos dos grãos de quartzo

Fonte: Amador (2012).

Existem faixas concêntricas de arredondamento que gradam do interior da Baía de Guanabara para sua área externa, de tipos angulosos, com pouco trabalho, a tipos arredondados, nos quais é elevado o estágio de maturidade textural (AMADOR, 2012).

Amador (2012) define três províncias, quanto às classes de arredondamento, que estão relacionadas a fontes distintas de sedimentos.

Primeira Província: relativa aos sedimentos modernos de origem fluvial, o arredondamento grada da classe de grãos angulosos (0,125 a 0,150), na foz dos rios da Baía, para a classe de grãos subarredondados (0,250 a 0,275), no canal principal autodragável.

Segunda província: com origem nos sedimentos pleistocênicos, retrabalhados, na área do canal da Ilha do Governador, as classes de arredondamento gradam da classe de subangular (0,175 a 0,200) até a classe de subarredondado no canal principal. Percebe-se por outro lado uma grande extensão das subclasses 0,200 a 0,225 e 0,225 a 0,250.

Terceira província: diz respeito às areias marinhas da área externa da Baía de Guanabara, onde todos os sedimentos se situam na classe de arredondados. Nesta área, onde os sedimentos relíquia da plataforma continental são submetidos à ação dos processos litorâneos, são nítidas três subclasses de arredondamento:

- a) Subclasse de 0,350 a 0,375, referente a uma estreita faixa que acompanha o litoral, e que corresponde à porção onde a ação de desgaste dos grãos é mais acentuada;
- b) Subclasse de 0,325 a 0,350, que é uma faixa estreita situada a Leste da entrada da Baía de Guanabara e bastante pronunciada no lado oeste, que constitui uma situação intermediária de nível de energia;
- c) Subclasse 0,300 a 0,325, que abrange uma larga faixa, atravessando as Ilhas do Pai e da Mãe, no lado direito da entrada da Baía de Guanabara e corresponde a uma zona exposta a menor trabalho. A área onde ocorre esta subclasse tem por característica oceanográfica a exposição à

ação intensa das vagas geradas pelos ventos de SW, que, no entanto, possuem uma baixa frequência de ocorrência.

4.4.2.4 Composição mineral da fração arenosa

Amador (2012) também analisou a composição mineral na fração arenosa, sendo que o quartzo é o principal constituinte mineralógico desta fração (Figura 125), sendo secundado pelas micas e pelos minerais pesados. Os feldspatos são minerais menores, raramente ultrapassando 2%.

Figura 125 – Presença de quartzo na composição mineralógica da fração arenosa

Fonte: Amador (2012).

Amador (2012) também analisou as micas, que ocorrem como mineral secundário numa ampla faixa que se estende do litoral de Caxias a São Gonçalo, com valores entre 20 e 40%. Essa mesma relação é encontrada em torno da Ilha do Governador (Figura 126).

Figura 126 – Presença de micas na composição mineralógica da fração arenosa

Fonte: Amador (2012).

As micas que identificam a fonte fluvial moderna são transportadas em suspensão, graças ao formato lamelar de suas partículas.

Entre os minerais pesados, que em média perfazem cerca de 5% da composição total média da fração areia dos sedimentos de fundo da Baía de Guanabara, Amador (2012) ordenou da seguinte forma, por ordem de abundância: ilmenita, magnetita, zircão, titanita, granada, cianita, silimanita, piroxênio, rutilo e epídoto. A ilmenita, que pode representar até 40% dos minerais pesados da areia, tende a se concentrar preferencialmente ao longo de canais de maré.

A ilmenita e a magnetita ocorrem como minerais acessórios nas áreas dominadas pelas areias quartzosas, como a região externa da Baía de Guanabara, o canal principal e o canal da Ilha do Governador. Na foz dos Rios Estrela, Macacu-Guapiaçu e Imboassu, as ilmenitas e as magnetitas constituem-se em acessórios das micas, que predominam como componentes da fração arenosa.

Amador (2012) também avaliou os constituintes orgânicos, que ocorrem ainda na fração arenosa, biodetritos constituídos por fragmentos e carapaças de moluscos e foraminíferos, fragmentos de folhas e raízes e restos vegetais. Os biodetritos,

ocorrendo em menos de 10% das amostras de sedimentos da Baía de Guanabara, têm sua distribuição concentrada em torno das Ilhas do Governador, Paquetá e Fundão. Gipsitas bem cristalizadas são observadas na região próxima ao litoral de Caxias, sendo um mineral de neoformação.

Infelizmente, a Baía de Guanabara passa por um processo de degradação ambiental, sendo possível detectar na composição da fração arenosa produtos artificiais como fragmentos de solda, carvão mineral, vidro, plásticos, entre outros (AMADOR, 2012).

Esta triste constatação vêm ao encontro com o exposto na seção 3 desta Tese. A extração de areia na região da entrada da Baía de Guanabara trará grandes benefícios ao meio ambiente. De maneira geral, pode-se considerar a melhoria da qualidade da água da Baía de Guanabara, bem como a concorrência com as operações em cavas ilegais predatórias nas regiões de Seropédica e Itaboraí.